



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

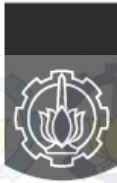
TUGAS AKHIR - TE141599

**ANALISIS PROBABILITAS ALIRAN DAYA OPTIMUM
MENGUNAKAN *FIRST ORDER SECOND MOMENT
METHOD* (FOSMM) PADA SISTEM TRANSMISI
LISTRIK**

**Moh. Malik Afandi
NRP 2212 100 092**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**ANALYSIS OF PROBABILISTIC OPTIMAL POWER
FLOW (POPF) USING FIRST ORDER SECOND
MOMENT METHOD (FOSMM) IN ELECTRIC
TRANSMISSION SYSTEM**

**Moh. Malik Afandi
NRP 2212100092**

**Supervisor
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

Analisis Probabilitas Aliran Daya Optimum Menggunakan *First Order Second Moment Method* (FOSMM) pada Sistem Transmisi Listrik

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

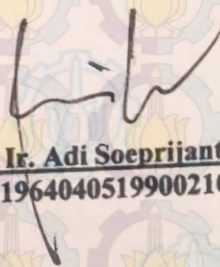
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001

Dosen Pembimbing II,



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021002



**LEMBAR PERNYATAAN
PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, yang bertanda tangan di bawah ini saya :

Nama : Moh. Malik Afandi
Nrp. : 2212 100 092
Jurusan / Fak. : Teknik Elektro / FTI
Alamat kontak : Dsn. Barden, Desa Minoharjo RT03/01, Widang - Tuban
a. Email : afandi.malik1206@gmail.com
b. Telp/HP : 0857 3660 6054

Menyatakan bahwa semua data yang saya upload di Digital Library ITS merupakan hasil final (revisi terakhir) dari karya ilmiah saya yang sudah disahkan oleh dosen penguji. Apabila dikemudian hari ditemukan ada ketidaksesuaian dengan kenyataan, maka saya bersedia menerima sanksi.

Demi perkembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (Non-Exclusive Royalty-Free Right)** kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Analisis Probabilitas Aliran Daya Optimum menggunakan First Order Second Moment Method (FORM) pada Sistem Transmisi Listrik

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya berhak menyimpan, mengalih-media/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (database), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta. Saya bersedia menanggung secara pribadi, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini tanpa melibatkan pihak Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dosen Pembimbing 1 :
Dibuat di : Surabaya
Pada tanggal : 27 Juni 2016
Yang menyatakan,

Dr. Eng. Pury Seto Mulyono, ST., MT.

NIP. 19741129 200012 1001

Moh. Malik Afandi

Nrp. 2212 100 092

KETERANGAN :

Tanda tangan pembimbing wajib dibubuhi stempel jurusan.

Form dicetak dan diserahkan di bagian Pengadaan saat mengumpulkan hard copy TA/Tesis/Disertasi.

ANALISIS PROBABILITAS ALIRAN DAYA OPTIMUM MENGGUNAKAN *FIRST ORDER SECOND MOMENT METHOD* (FOSMM) PADA SISTEM TRANSMISI LISTRIK

Nama Mahasiswa : Moh. Malik Afandi
NRP : 2212100092
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 197411292000121001
Dosen Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP : 196404051990021002

ABSTRAK

Optimal Power Flow (OPF) merupakan media yang efisien dan paling sering digunakan dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. Namun, model OPF memiliki beberapa kekurangan seperti ketidakakuratan pada gangguan acak atau faktor-faktor tak tentu seperti variasi dari beban nodal dan perubahan konfigurasi jaringan. Hal tersebut mengakibatkan kesalahan perhitungan pada sistem *load forecasting* pada pembangkit. Untuk mengatasi masalah tersebut, dipertimbangkan model baru dari OPF menggunakan pendekatan teori probabilitas melalui *Probabilistic-Optimal Power Flow* (P-OPF).

P-OPF merupakan model pengoperasian sistem tenaga menggunakan pendekatan secara statistik seperti standar deviasi, *mean*, fungsi kepadatan probabilitas (PDF) dan fungsi distribusi kumulatif (CDF). P-OPF mempunyai tingkat akurasi lebih tinggi daripada model OPF. Namun beberapa metode masih membutuhkan kemampuan komputer yang sangat tinggi seperti metode *Monte Carlo Simulation* (MCS). Metode *First Order Second Moment Method* (FOSMM) pada P-OPF tidak membutuhkan kemampuan komputer sebesar metode *Monte Carlo Simulation* dan kemampuan iterasi yang mendekati metode OPF konvensional. Hasil dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk menemukan nilai rata-rata dan simpangan baku dari semua variabel *optimal power flow* dinamik.

Kata kunci : POPF, Kapasitas Saluran, First Order Second Moment Method

ANALYSIS OF PROBABILISTIC-OPTIMAL POWER FLOW USING FIRST ORDER SECOND MOMENT METHOD (FOSMM) IN ELECTRIC TRANSMISSION SYSTEM

Nama Mahasiswa : Moh. Malik Afandi
NRP : 2212100092
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 197411292000121001
Dosen Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP : 196404051990021002

ABSTRACT

Optimal Power Flow (OPF) has been commonly used as an efficient tool on planning electricity system. But, OPF model has several disadvantages such as inaccurate on disturbance factors, uncertainty factors like variation of nodal load and the change of configuration system. This condition make some errors calculation in load forecasting system. Furthermore, to minimize the problem, OPF was transformed into statistical theory to be Probabilistic Optimal Power Flow (P-OPF).

P-OPF is a power system operation model using statistical approach such as standard deviation, mean, probability density function (PDF) and cumulative distribution function (CDF). P-OPF is more accurate than the OPF Model. However some methods like Monte Carlo Simulation (MCS) require high computer ability. The First Order Second Moment Method (FOSMM) is a new method to solving the P-OPF model without require high computer ability but has higher accuracy than the regular OPF model. The results of this final project are to find the mean and standard deviation of all the parameter of dynamic optimal power flow, so we are able to predict the future of its variable such as generating power.

Index Terms : *POPF, Network Capacity, First Order Second Moment Method*

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	5
 BAB 2 <i>FOSMM PADA OPTIMAL POWER FLOW</i>	 7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1 Pembangkitan.....	8
2.1.1.1 Generator	8
2.1.1.2 Transformator	12
2.1.2 Transmisi	12
2.1.3 Distribusi.....	12
2.1.4 Beban	12
2.2 <i>Optimal Power Flow</i>	14
2.2.1 AC Power Flow	14
2.3 <i>Probabilistic Optimal Power Flow</i>	18
2.3.1 <i>Monte Carlo Simulation</i>	19
2.3.2 <i>First Order Second Moment</i>	19
2.3.1.1 <i>Mean Value First Order Second Moment</i> ...	21
 BAB 3 PROBABILISTIC-OPTIMAL POWER FLOW (POPF) DENGAN METODE <i>FIRST ORDER SECOND MOMENT</i> (FOSM) PADA 9 BUS DAN 5 BUS IEEE.....	 23
3.1 Prosedur Komputasional	23
3.2 Penerapan FOSMM pada <i>Case 5 Bus</i>	25
3.3 Penerapan FOSMM pada <i>Case 9 Bus</i>	27

3.4	Penerapan FOSMM pada <i>Case</i> 14 Bus.....	29
BAB 4	SIMULASI PROGRAM P-OPF BERBASIS PERSAMAAN STATISTIK <i>FIRST ORDER SECOND MOMENT METHOD</i>	31
4.1	Validasi.....	31
4.1.1	Profil Sistem 1	37
4.1.1.1	<i>Hasil Simulasi 5 Bus dengan AC OPF</i>	37
4.1.1.2	<i>Hasil Simulasi 5 Bus dengan FOSMM</i>	39
4.1.2	Profil Sistem 2	41
4.1.2.1	<i>Hasil Sistem 9 Bus dengan AC OPF</i>	41
4.1.2.2	<i>DHasil Sistem 9 Bus dengan FOSMM</i>	42
4.1.3	Profil Sistem 3	44
4.1.3.1	<i>Hasil Sistem 14 Bus dengan AC OPF</i>	44
4.1.3.2	<i>Hasil Sistem 14 Bus dengan FOSMM</i>	46
4.2	Analisis Hasil Simulasi.....	47
4.2.1	Nilai Rata-Rata dan Simpangan Baku	47
4.2.2	Perbandingan Biaya dengan AC OPF.....	50
BAB 5	PENUTUP	53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran	53
	DAFTAR PUSTAKA	55
	LAMPIRAN	57
A.	Perbandingan Hasil AC OPF dan FOSMM	57
B.	Jacobian Matriks	59
	RIWAYAT PENULIS	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Tenaga Listrik	7
Gambar 2.2	Kriteria <i>SEQ</i>	8
Gambar 2.3	Unit Pembangkit Turbin-Boiler	9
Gambar 2.4	Karakteristik Masukan-Keluaran Pembangkit Termal	10
Gambar 2.5	Karakteristik <i>Incremental Heat Rate</i> Pembangkit Termal	10
Gambar 2.6	Karakteristik <i>Net Heat Rate</i> Pembangkit Termal	11
Gambar 2.7	Karakteristik Masukan-Keluaran Pembangkit Hidro	11
Gambar 2.8	Karakteristik <i>Incremental Water Rate</i> Pembangkit Hidro	12
Gambar 2.9	Kurva Beban Harian	13
Gambar 2.10	Diagram Impedansi Sistem 3 Bus	15
Gambar 2.11	Diagram Admitansi Sistem 3 Bus	15
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3.2	Profil Beban Dinamik 24 Jam	29
Gambar 4.1	Profil Beban Harian	32
Gambar 4.2	<i>Single Line Diagram</i> IEEE 5 Bus	32
Gambar 4.3	<i>Single Line Diagram</i> IEEE 9 Bus	33
Gambar 4.4	<i>Single Line Diagram</i> IEEE 14 Bus Termodifikasi	34
Gambar 4.5	Grafik Daya Terbangkit Sistem IEEE 5 Bus	40
Gambar 4.6	Perbedaan <i>Forecast</i> Daya Terbangkit & Profil Beban	41
Gambar 4.7	Perbandingan <i>Forecast</i> pada Sistem 9 Bus	44
Gambar 4.8	Perbandingan Daya Terbangkit AC OPF, FOSMM	45
Gambar 4.9	Persebaran Data Daya Terbangkit	49
Gambar 4.10	Perbandingan Biaya Pembangkitan	51
Gambar A.1	Perbandingan Hasil pada Sistem 5 Bus IEEE	57
Gambar A.2	Perbandingan Hasil pada Sistem 9 Bus IEEE	57
Gambar A.3	Perbandingan Hasil pada Sistem 14 Bus IEEE	58

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data IEEE 5 Bus	25
Tabel 3.2	Data Pembangkit 5 Bus	25
Tabel 3.3	Data Saluran IEEE 5 Bus	26
Tabel 3.4	Profil Beban 24 Jam	26
Tabel 3.5	Data IEEE 9 Bus	27
Tabel 3.6	Data Pembangkit 9 Bus	27
Tabel 3.7	Data Saluran dan Kapasitas Saluran IEEE 9 Bus	28
Tabel 3.8	Data IEEE 14 Bus	29
Tabel 3.9	Data Pembangkit 14 Bus	30
Tabel 4.1	Profil Beban.....	31
Tabel 4.2	Data Bus IEEE 5 Bus	34
Tabel 4.3	Data Bus IEEE 9 Bus	35
Tabel 4.4	Data Bus IEEE 14 Bus	35
Tabel 4.5	Data Pembangkit IEEE 5 Bus	36
Tabel 4.6	Data Pembangkit IEEE 9 Bus	36
Tabel 4.7	Data Pembangkit IEEE 14 Bus.....	36
Tabel 4.8	Data Saluran IEEE 5 Bus	36
Tabel 4.9	Data Saluran IEEE 9 Bus	36
Tabel 4.10	Hasil Daya dan Tegangan Bus Simulasi AC OPF.....	37
Tabel 4.11	Hasil Daya Reaktif, Sudut Tegangan Simulasi AC OPF...	38
Tabel 4.12	Hasil Daya dan Tegangan Bus Simulasi FOSMM	39
Tabel 4.13	Hasil Daya Terbangkit 9 Bus menggunakan AC OPF	42
Tabel 4.14	Hasil Daya Terbangkit 9 Bus menggunakan FOSMM.....	43
Tabel 4.15	Hasil Daya Terbangkit 14 Bus menggunakan AC OPF	44
Tabel 4.16	Hasil Daya Terbangkit 14 Bus menggunakan FOSMM.....	46
Tabel 4.17	Parameter Statistik pada Sistem 5 Bus	47
Tabel 4.18	Parameter Statistik pada Sistem 9 Bus	47
Tabel 4.19	Parameter Statistik pada Sistem 14 Bus	48
Tabel 4.20	Perbandingan Biaya Pembangkitan.....	50
Tabel B.1	Jacobian Matriks dari Sistem IEEE 5 Bus	59
Tabel B.2	Jacobian Matriks dari Sistem IEEE 9 Bus	60
Tabel B.3	Jacobian Matriks Vm dari Sistem IEEE 14 Bus.....	61

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan energi primer yang membutuhkan suatu operasi sistem untuk pembangkitan dan penyalurannya. Tujuan utama pengoperasian sistem adalah mempertahankan keadaan normal selama mungkin. Kriteria umum yang digunakan dalam menilai kinerja operasi sistem tenaga listrik adalah kriteria SEQ (*Security, Economy* dan *Quality*) [1]. *Security* atau sekuritas adalah kemampuan Sistem untuk menghadapi kejadian yang tidak direncanakan, tanpa mengakibatkan pemadaman. *Economy* atau ekonomi yaitu optimasi biaya pengoperasian sistem agar minimum tanpa melanggar batasan mutu dan keamanan. *Quality* yaitu kemampuan sistem untuk menjaga agar semua batasan operasi terpenuhi. Operasi sistem tenaga pada sistem kelistrikan diharapkan dapat menghasilkan sistem yang handal dan optimal secara ekonomi untuk mengatasi kondisi beban yang fluktuatif dalam 24 jam dengan memenuhi batasan operasi.

Optimal Power Flow (OPF) telah sering digunakan sebagai media yang efisien dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik. Model dari OPF telah mengalami perubahan dan perkembangan seiring dengan semakin banyaknya variasi sistem tenaga yang akan dioptimalkan. Selain itu, OPF juga merupakan salah satu media yang paling sering digunakan untuk *forecasting* dalam sistem tenaga listrik. Namun, banyak gangguan acak atau faktor-faktor tak tentu, seperti variasi dari beban nodal, perubahan dalam konfigurasi jaringan dan kesalahan *forecasting* atau penghitungan dari parameter dan variable input pada operasi sistem tenaga. Hal tersebut sangat mempengaruhi hasil dari OPF, paling tidak akan membuat beberapa ekstensi, ketidakakuratan [2,3].

Untuk mengatasi faktor-faktor tak tentu pada sistem tenaga, diputuskan untuk menggunakan OPF dengan konteks teori probabilitas atau yang sering disebut sebagai *Probabilistic-Optimal Power Flow* (POPF). POPF mengatasi masalah faktor-faktor tak tentu dari sistem tenaga sebagai variabel acak dengan distribusi probabilitas dan diperoleh informasi statistik optimal, seperti rata-rata, penyimpangan baku, fungsi kepadatan probabilitas (PDF) dan fungsi distribusi kumulatif (CDF) [3].

Optimalisasi aliran daya menggunakan metode *probabilistic* telah berkembang dan menjadi salah satu metode utama dengan mengambil faktor-faktor tak tentu dari beberapa parameter di sistem

tenaga. Contohnya adalah, hal yang diakibatkan dari perubahan biaya listrik. Hal tersebut dimodelkan secara *probabilistic* pada sistem POPF [4,5,6,7]. Beban sistem tersebut tidak bergantung terhadap waktu, namun yang dapat direpresentasikan dalam kurva beban. Salah satu metode yang digunakan dalam sistem POPF adalah *Monte Carlo Simulation* (MCS). Metode ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi namun membutuhkan kemampuan komputer yang lebih baik daripada metode OPF, sehingga masih menjadi metode skunder dalam sistem POPF [2].

Dalam Tugas Akhir ini, akan dikembangkan sistem POPF dengan *First Order Second Moment Method* (FOSMM). Ekspansi dari deret Taylor dengan melinierkan suatu sistem yang tidak linier dapat digunakan untuk mengurangi waktu komputasi. Ekspansi deret Taylor tersebut digunakan dalam metode *First Order Second Moment Method* (FOSMM) yang membutuhkan kemampuan komputer paling rendah dibandingkan sistem POPF yang lain dengan mempertimbangkan bagian operasi inisial lebih pada satu penghitungan numerik.

1.2 Permasalahan

Adapun fokus permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan sistem POPF dengan menggunakan ekspansi deret Taylor dalam metode *First Order Second Moment Method* (FOSMM).
2. Program pembebanan ekonomis distribusi energi listrik dengan POPF pendekatan *first order second moment method* dengan batasan kapasitas saluran, dan mempertimbangan kondisi perubahan terhadap beban selama 24 jam.
3. Perbandingan penggunaan POPF metode FOSMM dengan OPF metode FMINCON
4. Perbandingan dan pengaruh penggunaan metode FOSMM pada sistem IEEE 5 bus, 9 bus dan 14 bus.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan perencanaan tenaga listrik dengan POPF menggunakan pendekatan ekspansi deret Taylor dalam metode *First Order Second Moment Method* (FOSMM).

2. Membuat program pembebanan ekonomis distribusi energi listrik dengan POPF berbasis pendekatan *First Order Second Moment Method* dengan batasan kapasitas saluran dan mempertimbangkan kondisi perubahan terhadap beban selama 24 jam.
3. Membuat perbandingan penggunaan POPF metode FOSMM dengan AC OPF.
4. Membuat perbandingan penggunaan metode FOSMM pada sistem IEEE 5 bus, 9 bus dan 14 bus.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *Matlab Matpower*.
2. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan adalah *function of minimum constraint* dan *first order second moment method*.
3. Beban dinamis selama 24 jam dengan selang waktu satu jam.
4. *Losses* jaringan diabaikan.
5. Semua pembangkit diasumsikan selalu beroperasi.
6. Prioritas bus untuk pelepasan beban diabaikan.
7. Cadangan berputar sebesar kapasitas pembangkit terbesar
8. Sistem yang digunakan adalah IEEE 5 bus, IEEE 9 bus dan IEEE 14 bus.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini terbagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap pemodelan statistik, tahap pengujian sistem, dan tahap analisis. Berikut adalah penjelasan tentang masing-masing tahap penelitian yang digunakan dalam Tugas Akhir ini:

1.5.1 Studi Literatur

Studi literatur untuk mencari referensi bahan melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan *browsing* melalui internet yang berhubungan dengan judul Tugas Akhir ini. Referensi yang dicari mencakup teori prinsip kerja POPF, FOSM, Deret Taylor dan cara penentuan optimalnya pada sistem 5 Bus, 9 Bus dan 14 Bus IEEE.

1.5.2 Tahap Pemodelan Statistik

Tahap pemodelan statistik adalah tahap awal dimana sistem 5 Bus, 9 Bus dan 14 Bus IEEE akan dirumuskan secara statistik. Pemodelan statistik ini meliputi jumlah bus, jenis dan jumlah beban, serta konfigurasi jaringan dan tegangan masing-masing bus. Setelah diperoleh pemodelan secara statistik, kemudian akan dianalisis secara matematis dengan mengaplikasikan ekspansi Deret Taylor di dalam metode FOSMM. Adapun data yang digunakan terlebih dahulu menggunakan metode OPF FMINCON.

1.5.3 Tahap Simulasi

Tahap simulasi sistem ini adalah tahap lanjutan setelah terbentuk persamaan pemodelan secara statistik. Dalam tahap ini akan dirancang *listing program* dan disimulasikan dengan menggunakan software Matlab. Hasil simulasi tersebut akan melibatkan beberapa parameter yang digunakan untuk mendukung dan memudahkan proses selanjutnya.

1.5.4 Tahap Analisis

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi hasil pemodelan dan pengujian yang telah dilakukan. Tahap analisis dilakukan pada tiap kondisi simulasi sistem, kondisi sistem 5 Bus dan 9 Bus, nilai rata-rata, penimbangan baku, serta juga akan membandingkan keunggulan sistem yang telah dirancang dengan sistem lain yang sudah ada.

1.5.5 Penulisan Buku

Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan Tugas Akhir dan dikembangkan dalam bentuk jurnal. Laporan ditulis berdasarkan kesimpulan dan hasil analisis permasalahan beserta tahapan tahapannya.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab. Berikut adalah susunan laporan yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini:

BAB 1. Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan serta relevansi atau manfaat laporan Tugas Akhir

BAB 2. *First Order Second Moment Method* pada *Optimal Power Flow*

Bab ini berisi teori-teori penunjang yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada Tugas Akhir ini. Teori ini digunakan sebagai dasar dalam penulisan Tugas Akhir.

BAB 3. *Probabilistic-Optimal Power Flow* (POPF) dengan Metode *First Order Second Moment* (FOSMM) Pada 5 Bus, 9 Bus Dan 14 Bus IEEE

Bab ini berisi tentang rancangan bagaimana sistem 5 Bus, 9 Bus dan 14 Bus IEEE dimodelkan ke dalam bentuk persamaan statistik dengan metode FOSMM pendekatan ekspansi deret Taylor.

BAB 4. Simulasi Program POPF Berbasis Persamaan Statistik *First Order Second Moment Method*

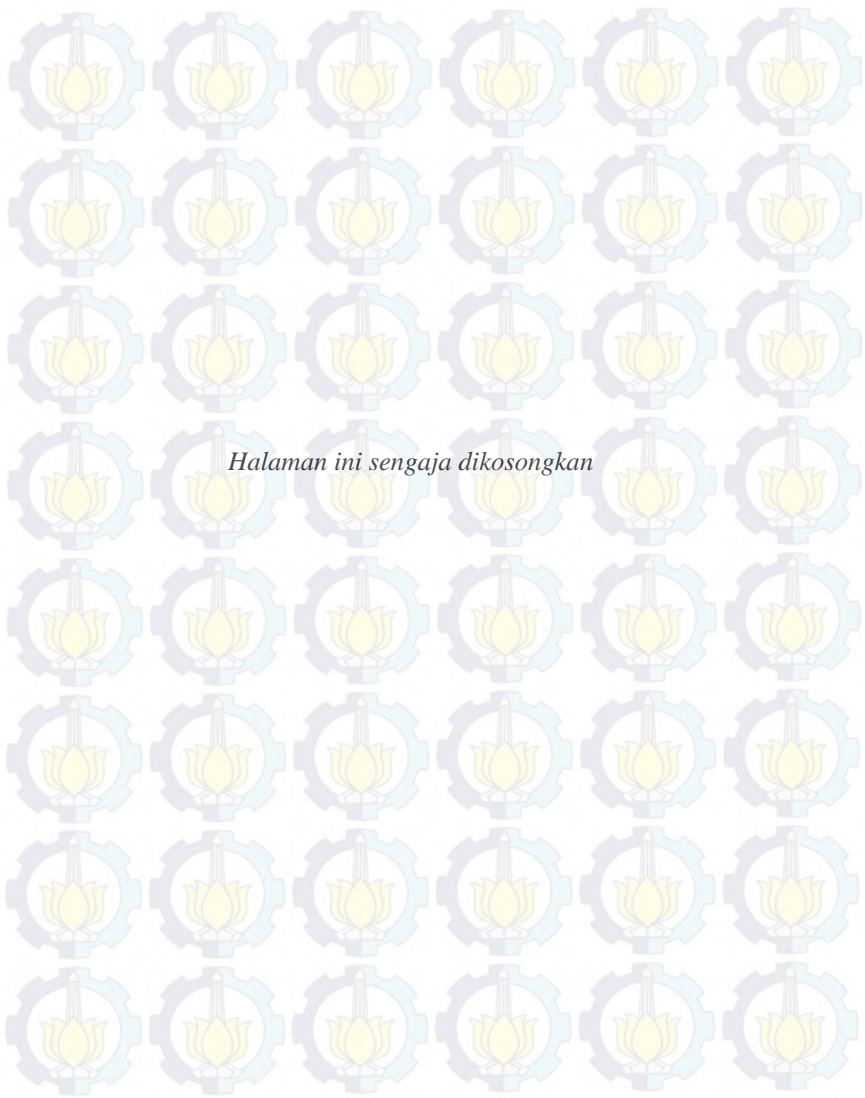
Bab ini berisi tentang analisis hasil simulasi dan *running program* POPF yang telah dilakukan dan pengkajiannya.

BAB 5. Penutup

Bab ini berisi tentang penutup yang memuat tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil eksperimen dan pengujian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi atau Manfaat

Tugas Akhir ini diharapkan dapat diaplikasikan sebagai metode perancangan dan pengoperasian sistem tenaga listrik berbasis POPF dengan hasil yang lebih akurat tanpa membutuhkan kemampuan komputer yang tinggi. Selain itu, Tugas Akhir ini juga diharapkan dapat memberikan inspirasi untuk penelitian POPF selanjutnya yang lebih mendalam.

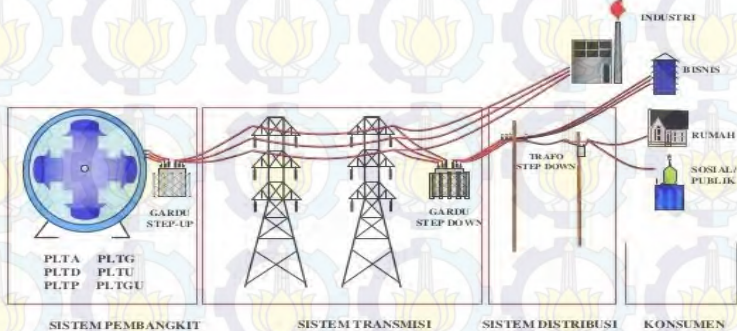


BAB 2

FIRST ORDER SECOND MOMENT METHOD PADA OPTIMAL POWER FLOW

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Secara umum, sistem tenaga listrik dibagi menjadi empat bagian utama, yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban [8]. Energi listrik dibangkitkan oleh pembangkit tenaga listrik pada sisi pembangkitan. Energi listrik kemudian akan disalurkan melalui saluran transmisi dan didistribusikan ke beban (pelanggan) melalui saluran distribusi seperti pada Gambar 2.1.

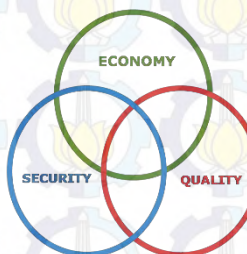


Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Terdapat kriteria dalam operasi sistem tenaga listrik, yaitu *security*, *economy*, dan *quality* [1]. *Security* atau sekuritas/keamanan merupakan kriteria mengenai keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. *Economy* atau ekonomi yaitu kriteria mengenai biaya operasi sistem. Biaya operasi khususnya biaya bahan bakar adalah biaya terbesar pada sistem operasi listrik. Terdapat teknik-teknik optimalisasi sehingga diharapkan sistem yang beroperasi merupakan sistem yang ekonomis dengan tetap memperhatikan batasan-batasan operasi. *Quality* atau kualitas yaitu kriteria mengenai kualitas dari sistem kelistrikan. Kualitas dari sistem kelistrikan dapat dilihat dari kualitas tegangan dan frekuensi yang sesuai standar, serta pembangkitan sistem memenuhi kebutuhan beban.

Prioritas dari ketiga kriteria tersebut tergantung kepada kondisi *real time*. Saat keadaan normal, aspek ekonomi sebaiknya diprioritaskan

untuk mengoptimalkan biaya operasi. Saat keadaan gangguan, maka keamanan merupakan hal yang perlu di prioritaskan untuk menjaga keamanan sistem. Ketiga hal tersebut tercapai secara bersamaan merupakan kondisi yang ideal. Pada kondisi normal maupun pada kondisi gangguan, diharapkan sistem tetap pada frekuensi standar, tingkat keamanan terhadap kondisi gangguan yang baik dan biaya operasi yang murah. Semua aspek tersebut tetap memperhatikan keandalan dan batasan operasi sistem.



Gambar 2.2 Kriteria *SEQ*

Salah satu parameter keamanan sistem operasi, yaitu adanya cadangan berputar yang cukup [9]. Cadangan berputar berperan penting untuk menjaga keandalan sistem pada keadaan gangguan. Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai cadangan berputar, besar cadangan berputar sebesar kapasitas maksimum unit pembangkit pada sistem atau ditentukan dari persentase beban puncak [10,11]. Cadangan berputar dapat didefinisikan sebagai total jumlah kapasitas unit pembangkit yang tersedia dan siap dibangkitkan, sebesar *rating* maksimum kapasitas unit yang paling besar pada sistem [12]. Ketika terjadi kegagalan pada satu atau lebih unit pembangkit, diharapkan frekuensi sistem tidak turun terlalu jauh karena beban akan dipenuhi oleh unit-unit yang lain dengan kapasitas yang masih mencukupi. Frekuensi turun dikarenakan total kebutuhan beban lebih besar daripada total daya yang dibangkitkan, begitu pula sebaliknya [13].

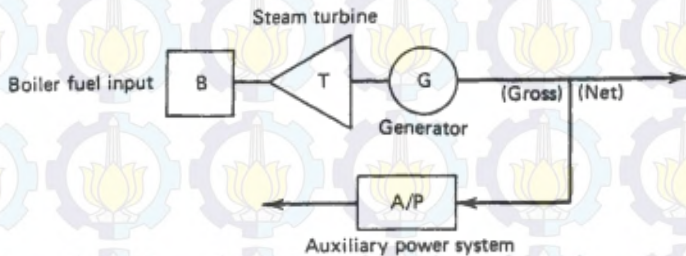
2.1.1 Pembangkitan

2.1.1.1. Generator

Generator yang sering digunakan pada sistem tenaga listrik yaitu generator tiga fasa atau generator sinkron. Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan prinsip induksi elektromagnet [14]. Energi mekanik dapat berasal dari turbin air, turbin

uap, turbin gas, dan lain sebagainya. Pada sistem tenaga, beberapa generator dioperasikan paralel untuk menyuplai beban [8].

Suatu generator memiliki *rating* masing masing, misalnya batasan daya maksimal dan minimal yang bisa dibangkitkan oleh sistem. *Rating* generator merupakan batasan yang sebaiknya dioperasikan sehingga generator dapat mencapai nilai efisien. Generator dapat dioperasikan dibawah batas daya minimumnya, namun hal ini tidak efisien dan generator juga dapat dioperasikan melebihi batas daya maksimumnya namun hal ini dapat mengakibatkan kerusakan pada generator. Penambahan maupun pengurangan keluaran generator mengikuti perubahan beban.



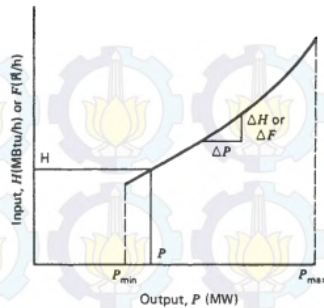
Gambar 2.3 Unit Pembangkit Turbin-Boiler

Biaya pembangkitan terbagi menjadi dua jenis, yaitu biaya tetap dan biaya variabel [15, 16]. Biaya tetap yaitu biaya yang dikeluarkan walaupun unit pembangkit tidak beroperasi, misalnya biaya pegawai, biaya administrasi, dan lain sebagainya. Sedangkan biaya variabel yaitu biaya yang berhubungan dengan jumlah energi listrik yang dibangkitkan, misalnya biaya bahan bakar, biaya pemeliharaan dan biaya perbaikan.

Untuk memahami karakteristik unit pembangkit termal, dapat didefinisikan sebagai berikut [8]:

H = Btu/jam input energi unit pembangkit (atau MBtu/h)

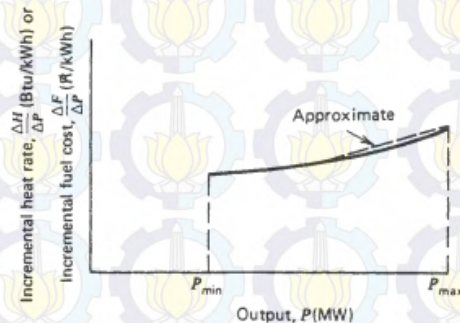
F = Biaya bahan bakar input unit pembangkit (R/h)



Gambar 2.4 Karakteristik Masukan-Keluaran Pembangkit Termal

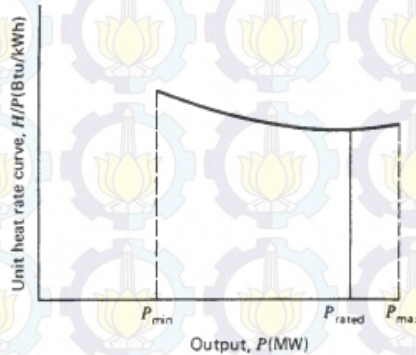
Karakteristik masukan dan keluaran unit pembangkit termal ditunjukkan pada gambar Gambar 2.4. Masukan unit pembangkit berupa bahan bakar yang dinyatakan dalam satuan energi per jam (H) atau satuan mata uang per jam (F). Sedangkan keluaran unit pembangkit merupakan daya yang dinyatakan dalam satuan MW.

Karakteristik *incremental heat rate* merupakan karakteristik kemiringan dari karakteristik masukan-keluaran yang merupakan perbandingan perubahan konsumsi bahan bakar dengan perubahan daya yang dihasilkan. *Incremental heat rate* dapat dinyatakan sebagai $\frac{\partial H}{\partial P}$ atau *Incremental cost rate* $\frac{\partial F}{\partial P}$



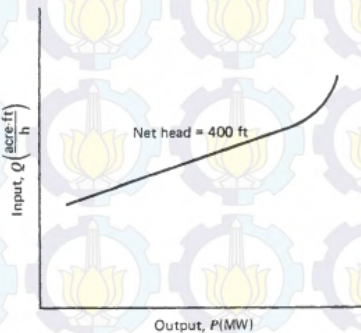
Gambar 2.5 Karakteristik *Incremental Heat Rate* Pembangkit Termal

Karakteristik *net heat rate* menyatakan perbandingan input bahan bakar per kWh dengan keluaran unit pembangkit per MW. Karakteristik ini menunjukkan karakteristik efisiensi dari mesin.

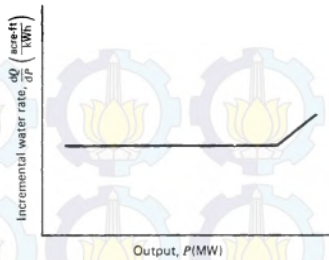


Gambar 2.6 Karakteristik *Net Heat Rate* Pembangkit Termal

Unit pembangkit hidro juga memiliki karakteristik karakteristik seperti pada unit pembangkit termal. Karakteristik masukan-keluaran yaitu kurva antara masukan pada pembangkit hidro berupa debit air dinyatakan dalam satuan m^3/h , dan keluaran berupa daya listrik yang dinyatakan dalam MW. Kurva masukan-keluaran unit pembangkit hidro ditunjukkan pada gambar Gambar 2.7. Karakteristik *incremental water rate* merupakan karakteristik perubahan debit air terhadap daya yang dibangkitkan ditunjukkan pada gambar Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Karakteristik Masukan-Keluaran Pembangkit Hidro



Gambar 2.8 Karakteristik *Incremental Water Rate* Pembangkit Hidro

2.1.1.2. Transformator

Salah satu komponen utama pada sistem tenaga yaitu transformator. Transformator merubah nilai tegangan pada sisi primer menjadi nilai tegangan yang berbeda pada sisi sekunder. Transformator *step up* secara umum digunakan pada sistem transmisi. Dengan nilai tegangan yang tinggi pada saat proses transmisi, *losses* akan berkurang dan lebih kecil dibandingkan transmisi dengan tegangan yang rendah.

1.1.1. Transmisi

Tujuan dari sistem transmisi yaitu untuk mentransfer energi listrik dari unit unit pembangkit menuju sistem distribusi yang menyuplai beban [7]. Tegangan dari unit unit pembangkit akan dinaikkan terlebih dahulu sebelum masuk ke saluran transmisi, kemudian akan diturunkan kembali ketika masuk ke saluran distribusi. Hal ini dilakukan untuk mengurangi *losses*. Untuk mengurangi daya reaktif, pada saluran transmisi juga dapat dipasang *capacitor bank* dan *reactor bank*. Pada saluran transmisi, perlu diperhatikan daya yang mengalir pada saluran harus memenuhi *rate* saluran untuk menjaga sistem tetap beroperasi dengan aman.

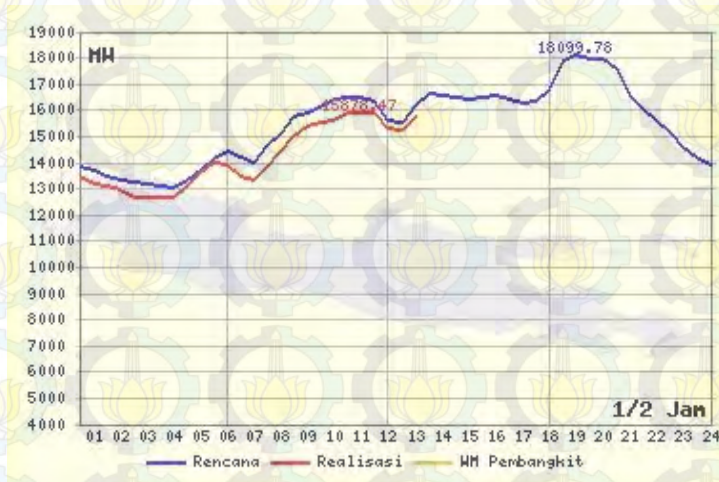
1.1.2. Distribusi

Setelah energi listrik dibangkitkan oleh pembangkit tenaga listrik dan disalurkan melalui saluran transmisi, energi listrik kemudian didistribusikan ke beban atau pelanggan melalui saluran distribusi. Sama halnya pada saluran transmisi, pada saluran distribusi perlu diperhatikan daya yang mengalir pada saluran.

1.1.3. Beban

Beban pada sistem tenaga dibagi menjadi beberapa kawasan yaitu kawasan industri, komersial, dan residensial. Berdasarkan

karakteristik beban pada masing masing kawasan, kebutuhan daya listrik selalu berubah ubah dalam satuan waktu. Kurva beban harian menunjukkan beban sistem sebagai fungsi waktu yang berlangsung selama satu hari (24 jam).



Gambar 2.9 Kurva Beban Harian

Pada kurva beban harian, dapat disimpulkan beban pada malam hari cenderung lebih tinggi dibandingkan beban pada siang hari. Permintaan daya minimal yang berlangsung sepanjang hari disebut dengan beban dasar. Sedangkan permintaan daya maksimum yang hanya berlangsung beberapa jam disebut dengan beban puncak. Beban antara beban dasar dan beban puncak disebut beban menengah [7, 15].

Masing masing beban dipikul oleh pembangkit yang karakteristiknya sesuai untuk memenuhi kebutuhan beban. Pemikul beban dasar yaitu pembangkit yang memiliki daya keluaran yang besar, biaya kapital tinggi, dan biaya operasi rendah, sebagai contoh yaitu pembangkit tenaga uap, panas bumi, dan lain sebagainya. Pemikul beban menengah yaitu pembangkit berbahan bakar gas, pembangkit gas-uap, dan lain sebagainya. Sedangkan pembangkit untuk memikul beban puncak yaitu pembangkit yang berbiaya kapital rendah, mudah diatur daya keluarannya, dan biaya operasi tinggi, misalnya pembangkit berbahan bakar minyak, air, *pump storage*, dan lain sebagainya.

2.2 *Optimal Power Flow (OPF)*

Studi aliran daya merupakan bagian yang sangat penting karena digunakan untuk menganalisa perencanaan, operasi dan penjadwalan ekonomis. Beberapa metode untuk menghitung aliran daya antara lain *Gauss-Seidel*, *Newton Rhapson*, dan metode *Fast Decouple*. Tujuan studi aliran daya yaitu untuk mengetahui besar tegangan dan sudut fasa pada setiap bus serta aliran daya pada tiap saluran [7,8]. Sistem tenaga memiliki tiga jenis bus, yaitu:

- *Swing* atau *slack bus*

Nilai tegangan (V) dan sudut tegangan (Θ) adalah 0, dan nilainya tetap. *Swing bus* dijadikan sebagai referensi. Besaran yang dapat dihitung adalah daya aktif dan daya reaktif.

- *Generator bus (PV Bus)*

Besaran yang diketahui yaitu daya aktif (P) dan nilai tegangan generator (V). Dapat disebut juga dengan *voltage controlled bus* karena nilai tegangan pada bus ini nilainya konstan. Besaran yang dihitung yaitu daya reaktif (Q) dan sudut tegangan (Θ).

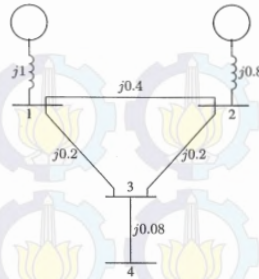
- *Load bus (PQ Bus)*

Besaran yang diketahui yaitu daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). *Load bus* merupakan bus yang tidak terhubung dengan generator. Besaran yang dihitung yaitu nilai tegangan (V) dan sudut tegangan (Θ).

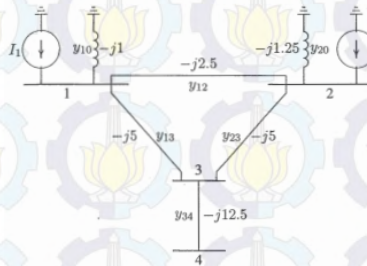
Secara umum, OPF berbasis pada model injeksi bus yang telah dihubungkan dengan sistem transmisi dan model aliran cabang yang telah digunakan untuk sistem distribusi radial [7,8]. Jangkauan yang luas dari OPF telah dikembangkan, termasuk gradien konjugat, *successive quadratic programming*, *branch and node*, relaksasi *Lagrange*, metode titik interior, penguatan simulasi, algoritma genetik dan optimasi partikel *swan* yang direpresentasikan dengan beberapa pertimbangan antara optimisasi, kecepatan konvergen antara keanekaragaman dan penyesuaian untuk masalah spesifik [9,10].

2.2.1 AC Power Flow [7,8]

Perhitungan *power flow* sistem 3 bus menggunakan matriks admitansi bus sebagai berikut:



Gambar 2.10 Diagram Impedansi Sistem 3 Bus



Gambar 2.11 Diagram Admitansi Sistem 3 Bus

Jaringan transmisi memiliki data impedansi dan admitansi tiap salurannya. Sebagai contoh yaitu jaringan AC dengan diagram impedansi dan admitansi pada Gambar 2.10 dan 2.11. Dengan mengaplikasikan hukum KCL pada setiap node, didapatkan:

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 \quad (2.1)$$

$$I_2 = -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3$$

$$0 = -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4$$

$$0 = -y_{34}V_3 + y_{34}V_4$$

Dengan admitansi

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13} \quad (2.2)$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23}$$

$$Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{34}$$

$$\begin{aligned}
Y_{44} &= y_{34} \\
Y_{12} &= Y_{21} = -y_{12} \\
Y_{13} &= Y_{31} = -y_{13} \\
Y_{23} &= Y_{32} = -y_{13} \\
Y_{34} &= Y_{43} = -y_{34}
\end{aligned}$$

Sehingga persamaan KCL pada setiap node dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{aligned}
I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \\
I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \\
I_3 &= Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \\
I_4 &= Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Dengan mengasumsikan bus sistem sebanyak n , persamaan diatas dapat dibentuk dalam matriks

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus} \tag{2.5}$$

Menggunakan matriks admitansi, nilai tegangan dan sudut tegangan dapat dihitung dengan menggunakan metode Gauss Seidel, Newton Rhapson, Fast Decouple, dan lain sebagainya. Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai Fast Decouple.

Metode Fast Decouple merupakan penyederhanaan metode Newton Rhapson dengan beberapa asumsi. Hal ini untuk mempercepat dan menyederhanakan perhitungan aliran daya. Asumsi pada metode ini adalah sebagai berikut:

- ❖ Perubahan daya aktif sistem hampir tidak berpengaruh terhadap perubahan magnitude tegangan, namun sangat berpengaruh terhadap perubahan sudut fasa

$$\frac{\partial P_i}{\left(\frac{\partial |E_k|}{|E_k|}\right)} = 0 \quad (2.6)$$

- ❖ Perubahan daya reaktif sistem sangat berpengaruh terhadap perubahan magnitudo tegangan, namun hampir tidak berpengaruh terhadap perubahan sudut fasa

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial \theta_k} = 0 \quad (2.7)$$

- ❖ Perbedaan sudut tegangan bus yang sangat kecil mendekati nol, maka

$$\sin(\theta_i - \theta_k) \cong 0 \quad (2.8)$$

$$\cos(\theta_i - \theta_k) \cong 1$$

- ❖ Jaringan transmisi umumnya memiliki perbandingan X/R yang tinggi, dengan demikian

$$G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) \ll B_{ik} \quad (2.9)$$

$$Q_i \ll B_{ii} |E_i|^2 \quad (2.10)$$

$$-B_{ik} = -\frac{1}{x_{ik}} \quad (2.11)$$

Berdasarkan asumsi asumsi diatas, maka elemen N dan J pada matriks Jacobian dapat diabaikan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta |E_k|}{|E_k|} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = -|E_i||E_k|B_{ik} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\left(\frac{\partial |E_k|}{|E_k|}\right)} = -|E_i||E_k|B_{ik} \quad (2.14)$$

$$\Delta P_i = -|E_i||E_k|B_{ik}\Delta\theta_k \quad (2.15)$$

$$\Delta Q_i = -|E_i||E_k|B_{ik}\frac{\Delta |E_k|}{|E_k|} \quad (2.16)$$

Dengan nilai $|E_k| \cong 1$, dan kedua persamaan dibagi dengan $|E_i|$, maka:

$$\frac{\Delta P_i}{|E_i|} = -B_{ik} \Delta \theta_k \quad (2.17)$$

$$\frac{\Delta Q_i}{|E_i|} = -B_{ik} \Delta |E_k| \quad (2.18)$$

Persamaan kemudian dijadikan kedalam bentuk matriks, menjadi persamaan umum Fast Decouple.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{|E_1|} \\ \frac{\Delta P_2}{|E_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_1}{|E_1|} \\ \frac{\Delta Q_2}{|E_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} \Delta |E_1| \\ \Delta |E_2| \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.3 Probabilistic Optimal Power Flow (P-OPF)

OPF dan P-OPF merupakan dua hal sangat penting dalam permodelan sistem tenaga dan operasinya terutama pada pembangkitan energi terbarukan yang saat ini meningkat dan terintegrasi dengan jala-jala [17]. P-OPF sendiri memiliki perbedaan mendasar dengan OPF. P-OPF menggunakan metode pendekatan secara *probabilistic*, yaitu dengan fungsi *Probabilistic Density Function* (PDF) dan *Cumulative Density Function* (CDF) [2]. P-OPF mengatasi masalah faktor-faktor tak tentu dari sistem tenaga sebagai variabel acak dengan distribusi probabilitas pasti dan diperoleh informasi statistik dari solusi optimal, seperti rata-rata, standar deviasi, fungsi PDF dan fungsi CDF [2].

Terdapat banyak sekali metode permodelan P-OPF sampai saat ini, salah satunya adalah metode *Monte Carlo Simulation* (MCS). Metode MCS memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, namun membutuhkan kemampuan komputer yang jauh lebih besar daripada model OPF konvensional [2]. Hal tersebut dikarenakan jumlah iterasi dari model P-

OPF dengan metode MCS lebih banyak daripada model OPF konvensional. Metode yang lain adalah dengan menggunakan pendekatan derat Taylor melalui metode (*First Order Second Moment*) FOSM.

2.3.1 Monte Carlo Simulation (MCS)

Model P-OPF dapat diformulasikan dalam bentuk pemrograman stokastik nonlinier melalui persamaan (2.21) [2].

$$\min\{f(x)|g(x) = b_0, h(x) \leq 0 \quad (2.21)$$

dimana $f(x)$ merupakan fungsi objek, dan $g(x) = b_0$, dan $h(x) \leq 0$ merupakan persamaan dan paksaan ketidakrataan. Untuk fungsi matematik yang lebih jelas terdapat pada paper [2]. Kondisi optimalisasi biasanya terdapat pada pemetaan probabilitas nonlinier. Keberagaman pada sistem tenaga dimodelkan sebagai vector acak $X = (x_1 \dots x_i \dots x_m)^T$ dengan korelasi matriks R_x .

Pada tugas akhir ini, metode MCS digunakan sebagai pembandingan dengan metode utama yaitu FSOMM untuk memperoleh hasil yang lebih objektif. Pada banyak literatur menyebutkan bahwa metode MCS sudah tidak diragukan lagi tingkat akurasinya, namun metode MCS memiliki kekurangan yaitu membutuhkan kemampuan komputer yang lebih tinggi dibandingkan metode yang lain [2].

2.3.2 First Order Second Moment Method (FOSMM)

FOSMM menggunakan pendekatan deret Taylor orde pertama yang dikomputasikan ke orde kedua secara statistik. FOSMM bermula dari sistem yang non linier dengan persamaan (2.22):

$$Z=y(x) \quad (2.22)$$

Z = output vektor

y = fungsi vektor non linier

x = vector acak dengan mean \hat{x}

Secara umum, fungsi performansi dari sistem FOSMM dapat ditulis sebagai berikut:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \begin{cases} > 0, \text{ kondisi aman} \\ = 0 \text{ kondisi limit} \\ < 0 \text{ kondisi salah} \end{cases} \quad (2.23)$$

Dimana $g(X)=0$ dikenal sebagai kondisi limit dan setiap C mengindikasikan beban dasar atau variabel resistansi. Biasanya, jumlah dari kondisi limit dapat diidentifikasi untuk sebuah sistem dengan masing-masing representasi sebuah kondisi dari kegagalan sistem, sistem yang tidak bekerja, atau malfungsi pada pengoperasiannya. Untuk mempermudah pengembangan dan analisisnya, semua variabel di transformasi ke bentuk standarisasinya (2.24).

$$Xi' = \frac{Xi - \bar{Xi}}{\sigma_i} \quad (2.24)$$

Nilai ekspektasi dan standar deviasi dari X_i' adalah nol. Persamaan kondisi limit selanjutnya harus dituliskan dengan bentuk yang sama dengan variabel X , sehingga menjadi seperti berikut (2.25):

$$g(X1', X2', \dots, Xn') \begin{cases} > 0, \text{ kondisi aman} \\ = 0 \text{ kondisi limit} \\ < 0 \text{ kondisi salah} \end{cases} \quad (2.25)$$

Secara umum, $g(X')$ merupakan fungsi non linier. Namun, fungsi tersebut dapat dilinierkan pada beberapa point X'^0 menjadi:

$$g(X') = g(x'^0) + \nabla g(x'^0)^T (X' - x'^0) + o(\|X' - x'^0\|) \quad (2.26)$$

Dimana:

$$\nabla g(x'^0) = \left[\frac{\partial g}{\partial x_1}(x'^0) \dots \frac{\partial g}{\partial x_1}(x'^0) \right]^T \quad (2.27)$$

Bentuk order yang lebih tinggi dihilangkan dengan asumsi bahwa X 's adalah tidak berkorelasi secara statistik, nilai ekspektasi dan standar deviasi dari $g(X')$ adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \bar{g}_0 &= g(x'^0) - \nabla g(x'^0)^T x'^0 \\ \sigma_{g_0}^2 &= \nabla g(x'^0)^T \nabla g(x'^0) \\ \beta_0 &= \frac{\bar{g}_0}{\sigma_{g_0}} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Jika X 's berkorelasi, maka bisa digunakan prinsip transformasi komponen sebelum distandarisasi.

Untuk distribusi probabilitas, FOSMM dapat menggunakan orde pertama dan orde kedua yang didapat dari karakteristik probabilitas variabel acak. FOSMM digunakan sebagai nilai untuk karakteristik probabilitas dari beban [1]. Formulasi metode FOSMM menggunakan fungsi Lagrange (2.29) sebagai berikut:

$$L(\omega) = c(x) - \lambda^T (g(x) - b) - \mu^T h(x) \quad (2.29)$$

dimana λ dan μ = Vektor dari perkalian Lagrange $\omega = [x^T, \lambda^T, \mu^T]$ Kemudian, fungsi (2.2) tersebut dioptimalkan menggunakan metode Karush-Kuhn-Tucker (KKT) melalui persamaan (2.30) berikut ini.

$$\begin{aligned} \nabla_x L(\omega) &= 0 \\ g(x) - b &= 0 \\ h(x) &\geq 0, \mu \geq 0, \mu_i h_i = 0, (i = 1, \dots, p) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Pada paper [2] menyebutkan bahwa, kesuksesan dari metode solusi tergantung pada kemampuan untuk menemukan mengikat ketidakrataan dengan efisien, dan metode tersebut tidak bisa bekerja dengan baik ketika persamaan iteratif nya dalam keadaan yang rusak. Model P-OPF dapat dengan mudah mengatasi ketidakrataan. Keuntungan yang lain dari metode ini adalah dapat menghindari kondisi yang cacat dengan menggunakan matriks koefisien iteratif.

2.3.2.1 Mean Value First Order Second Moment (MVFOSM)

Dalam metode MVFOSM, indeks keandalan didefinisikan sebagai rasio dari nilai rata-rata dan standar deviasi dengan fungsi limit-state sebagai berikut ini:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (2.31)$$

Validasi dari β sebagai probabilitas kegagalan dapat diperoleh melalui PDF dari fungsi limit-state. Hal tersebut tidak berlaku jika g merupakan fungsi linier dari variabel acak normal atau untuk hal yang lebih mudah adalah PDF tidak bisa dianalisis.

Rumus untuk perhitungan dari μ_g dan σ_g diketahui dari analisis fungsi. Jika fungsi limit adalah linier, maka μ_g dan σ_g adalah sama. Jika fungsi tersebut tidak linier maka digunakan pendekatan orde pertama sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu_g &\approx g(M_x) \\ \sigma_g &\approx \sqrt{\nabla g(M_x)^T \sum_{xx} \nabla g(M_x)} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Persamaan diatas meberpotensi tidak aktrat yang mana merupakan *invariance problem* dari metode MVFOSM. Hal tersebut diakibatkan karena MVFOSM terkadang memberikan hasil yang berbeda untuk fungsi limit state ekivalen. Dua fungsi limit state ekivalen jika $g=0$.

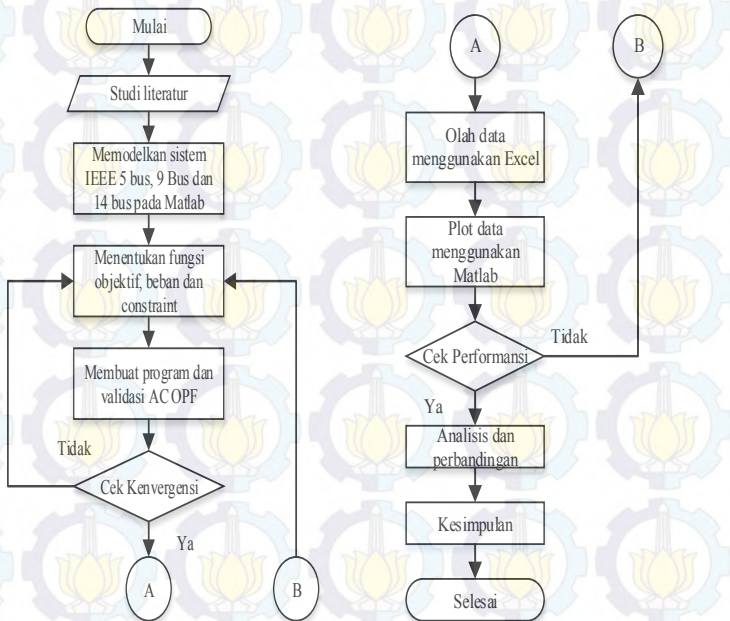


BAB 3

PROBABILISTIC-OPTIMAL POWER FLOW (P-OPF) DENGAN METODE *FIRST ORDER SECOND MOMENT (FOSM) PADA 5 BUS, 9 BUS DAN 14 BUS IEEE*

3.1 Prosedur Komputasional

Penelitian ini menggunakan perhitungan statistik dalam pembagian pembebanan generator, atau sering disebut sebagai *Probabilistic Optimal Power Flow (POPF)*. Metode yang digunakan adalah *first order second moment (FOSMM)* dimana pada metode ini mencoba melinierkan sistem yang tidak linier. Pengolahan data dan simulasi dilakukan dengan menggunakan Matlab R2011a, dan dengan menggunakan dile Matpower 5.1 serta pengolahan menggunakan Microsoft Excel. Alur yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Pembuatan tugas akhir ini diawali dengan setudi literatur tentang sistem kelistrikan, aliran daya dan optimasi menggunakan AC OPF. Setelah itu pada tugas akhir ini juga mempelajari tentang pemodelan statistik dan fungsi-fungsi statistik lain seperti rata-rata, simpangan baku, *probability density function*, serta *first order second moment*. Untuk pemodelan digunakan *case* matpower 5 bus, 9 bus dan 14 bus dengan beban dari [2]. Setelah itu menentukan fungsi objektif dan batasan masalah. Simulasi POPF FOSMM ini dilakukan dengan tiga tahap.

Tahap pertama adalah simulasi AC OPF dengan menggunakan file matpower dengan beberapa penyesuaian dan modifikasi, seperti beban harian. Data yang diperoleh dari hasil simulasi ini adalah matriks Jacobian. Selain matriks Jacobian, dalam simulasi ini juga diambil data parameter saluran seperti tegangan, sudut tegangan, dan daya yang terbangkit. Hal ini digunakan untuk membandingkan hasil AC OPF dengan POPF.

Tahap kedua adalah olah data menggunakan Excel. Dalam hal ini, matriks Jacobian yang telah diperoleh melalui simulasi AC OPF diolah sedemikian rupa, sehingga diperoleh variabel variabel statistik seperti rata-rata, varians, dan simpangan baku. Dalam pengambilan data ini, digunakan metode FOSMM berikut.

$$\mu = y(\bar{L}_0) + \sum_{i=1}^n \frac{\delta y(L)}{\delta L_i} (\bar{L}_i - \bar{L}_0) \quad (3.1)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\delta y(L)}{\delta L_i} \frac{\delta y(L)}{\delta L_j} Cov(L_i, L_j) \quad (3.2)$$

dimana $y(L)$ merupakan fungsi objektif dari masing-masing parameter, μ merupakan nilai rata-rata, dan σ^2 merupakan varians. Nilai simpangan baku dapat diperoleh melalui akar dari varians.

Setelah didapatkan nilai rata-rata dan simpangan baku, kemudian data diolah lagi di Matlab untuk memperoleh grafik dari fungsi *probabilistic density function*. Fungsi ini digunakan untuk mengetahui sebaran data yang diperoleh sehingga jika terjadi kesalahan maka akan kembali ketahap pertama.

Tahap terakhir adalah analisis semua data yang diperoleh kemudian membandingkannya dengan hasil simulasi secara AC OPF. Dari data yang diperoleh ini bisa diketahui tingkat akurasi dari FOSMM sebelum ditulis kedalam laporan.

Selanjutnya dilakukan hal yang sama pada penerapan sistem IEEE 9 bus. Setelah semua data diperoleh, maka akan dianalisis akurasi FOSMM terhadap sistem IEEE 5 bus, IEEE 9 bus dan IEEE 14 bus. Sehingga dapat menemukan faktor-faktor yang mempengaruhi akurasi dari FOSMM. Setelah dilakukan analisis dan perbandingan, maka kesimpulan dari tugas akhir ini dapat diperoleh.

3.2 Penerapan FOSMM pada Case 5 Bus

Data yang digunakan dalam penerapan metode FOSMM ini adalah dari dari matpower IEEE. Data bus dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Data IEEE 5 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	2	0	230
2	1	L1	230
3	2	L2	230
4	3	L3	230
5	1	0	230

Tipe bus tipe 1 adalah Pq bus, sedangkan bus tipe 2 adalah Pv bus yang biasanya terhubung langsung dengan generator. Sementara itu, bus tipe 3 adalah *slack* bus yang digunakan untuk referensi dan cadangan pembangkit. Pada sistem IEEE 5 bus ini base tegangan yang digunakan adalah 230 kV.

Tabel 3.2 Data Pembangkit 5 bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)
1	$14P_1$	240	10
3	$40P_3$	100	10
4	$40P_4$	350	10

Pada Tabel 3.2 dapat dilihat bahwa *cost function* yang digunakan pada sistem IEEE 5 bus ini adalah polinomial dengan P_i adalah jumlah daya yang dibangkitkan masing-masing generator i . Daya maksimal yang mampu dibangkitkan sistem ini adalah 690 MW dengan nilai *slack bus* mencapai 350 MW. Nilai *slack bus* yang besar ini digunakan sebagai cadangan daya ketika terjadi beban penuh pada saluran.

Tabel 3.3 Data Saluran IEEE 5 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	2	0.0281	400
2	1	4	0.0304	400
3	1	5	0.0064	400
4	2	3	0.0108	400
5	3	4	0.0297	400
6	4	5	0.0297	240

Dari Tabel 3.3 diperoleh informasi bahwa nilai x merupakan nilai reaktansi saluran. Dimana nilai ini bergantung terhadap jenis kabel transmisi dan juga panjang saluran. Saluran tersebut juga memiliki kapasitas saluran yang digunakan untuk membatasi aliran daya sehingga kestabilan sistem tetap terjaga. Untuk profil beban yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah beban dinamik 24 jam yang didapatkan dari [2]. Profil beban dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Profil Beban 24 Jam

Jam	Beban 1 (pu)	Beban 2 (pu)	Beban 3 (pu)
1	0.6	1.05	0.35
2	0.6	1.05	0.35
3	0.6	0.2	0.35
4	0.6	0.2	0.35
5	0.6	0.2	0.35
6	0.95	0.2	0.96
7	0.95	0.6	2.8
8	0.95	0.8	1.55
9	1.2	0.5	0.6
10	1.4	0.5	1.25
11	1.6	0.5	2.4
12	0.6	1.35	1.8
13	0.6	1.35	0.2
14	0.95	1.6	0.2
15	1.3	1.6	0.2
16	1.6	2	1.75
17	1.6	2	1.6
18	1.6	1.1	0.2
19	0.7	0.4	0.2

Jam	Beban 1 (pu)	Beban 2 (pu)	Beban 3 (pu)
20	1.2	1.25	0.95
21	1.2	1.25	2.8
22	0.95	1.25	2.4
23	0.9	1.25	0.95
24	0.65	1.25	0.3

Setelah semua data dimasukkan dan disimulasikan melalui program AC OPF, maka diharapkan akan didapatkan matriks Jacobian $G(x)$ 10×20 sebagai berikut.

$$G(x) = \begin{bmatrix} \frac{dV_{ai}}{dP_{gi}} & \frac{dV_{ai}}{dQ_{gi}} \\ \frac{dV_{mi}}{dP_{gi}} & \frac{dV_{mi}}{dQ_{gi}} \\ \frac{dP_{gi}}{dP_{gi}} & 0 \\ 0 & \frac{dQ_{gi}}{dQ_{gi}} \end{bmatrix}$$

Dimana i merupakan panjang data atau jumlah data yang ada pada sistem saluran.

3.3 Penerapan FOSMM pada Case 9 Bus

Penerapan FOSMM pada IEEE 9 bus juga sama seperti penerapan terhadap sistem 5 bus. Data dari sistem IEEE 9 bus dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.5 Data IEEE 9 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	3	0	345
2	2	0	345
3	2	0	345
4	1	0	345

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
5	1	L1	345
6	1	0	345
7	1	L2	345
8	1	0	345
9	1	L3	345

Pada sistem IEEE 9 bus, tegangan base yang digunakan adalah 345 kV berbeda dengan sistem IEEE 5 bus yang memiliki tegangan base 230 kV. Selain itu, *cost function* dari *case 9* bus juga sedikit berbeda dengan *case 5* bus meskipun sama-sama polinomial.

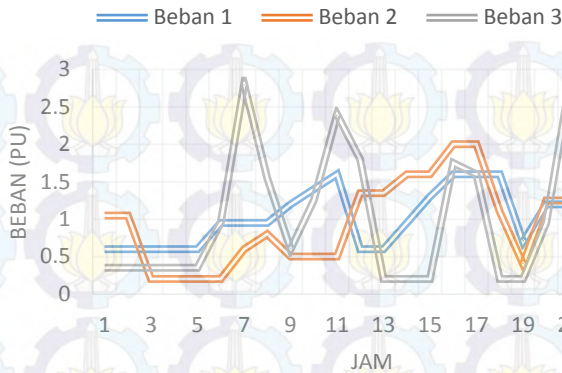
Tabel 3.6 Data Pembangkit 9 bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	250	10
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	300	10
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 335$	270	10

Tabel 3.7 Data Saluran dan Kapasitas Saluran IEEE 9 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	4	0.0576	250
2	4	5	0.092	250
3	5	6	0.17	150
4	3	6	0.0586	300
5	6	7	0.1008	150
6	7	8	0.072	250
7	8	2	0.0625	250
8	8	9	0.161	250
9	9	4	0.085	250

Profil beban yang digunakan sama dengan profil beban yang digunakan pada sistem 5 bus, dimana terdapat tiga beban yang memiliki nilai berbeda setiap jam nya. Beban ini didapatkan dari referensi paper acuan [2]. Beban ini dibuat tidak linier seperti pada beban beban biasa karena untuk membuktikan ke akuratan metode FOSMM dalam aliran daya beban tidak linear.



Gambar 3.2 Profil Beban Dinamik 24 Jam

Gambar 3.2 menunjukkan bahwa beban pada sistem terdiri dari tiga beban yang memiliki perubahan tak tentu setiap jam nya. Hal ini yang akan diselesaikan dan dicari *forecast* pembangkitannya dengan cara menjadikan grafik beban tersebut lebih linier.

3.4 Penerapan FOSMM pada Case IEEE 14 Bus

Penerapan data terakhir dalam penelitian tugas akhir ini adalah sistem IEEE 14 bus dengan modifikasi di bagian beban. Pada sistem IEEE 14 bus awalnya memiliki lima beban, namun pada penelitian ini digunakan profil tiga beban seperti pada sistem IEEE 5 bus dan IEEE 9 bus sebelumnya. Data bus dari sistem IEEE 14 bus dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Data IEEE 14 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	3	0	300
2	2	0	300
3	2	0	300
4	1	0	300
5	1	0	300
6	2	0	300
7	1	0	300
8	2	0	300
9	1	L1	300

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
10	1	L2	300
11	1	L3	300
12	1	0	300
13	1	0	300
14	1	0	300

Sistem IEEE 14 ini memiliki lima unit pembangkit yang memiliki kapasitas daya yang berbeda beda. Setiap pembangkit juga memiliki *cost function* yang berbeda. Data pembangkit dari sistem IEEE 14 bus ini dapat dilihat pada Tabel 3.9 berikut ini.

Tabel 3.9 Data Pembangkit 14 Bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)
1	$0.043P_1^2 + 20P_1$	332	10
2	$0.025P_2^2 + 20P_2$	140	10
3	$0.01P_3^2 + 40P_3$	100	10
4	$0.01P_4^2 + 40P_4$	100	10
5	$0.01P_5^2 + 40P_5$	100	10

Cost Function dari sistem IEEE 14 bus berbeda-beda namun pada unit 3, 4 dan 5 hampir sama dan cenderung lebih mahal daripada unit 1 dan unit 2. Sedangkan pembangkit dengan kapasitas terbesar adalah unit satu dengan 332 MW, dan yang terkecil adalah unit 3, 4 dan 5.

BAB 4

SIMULASI PROGRAM POPF BERBASIS PERSAMAAN STATISTIK *FIRST ORDER SECOND MOMENT METHOD*

4.1 Validasi

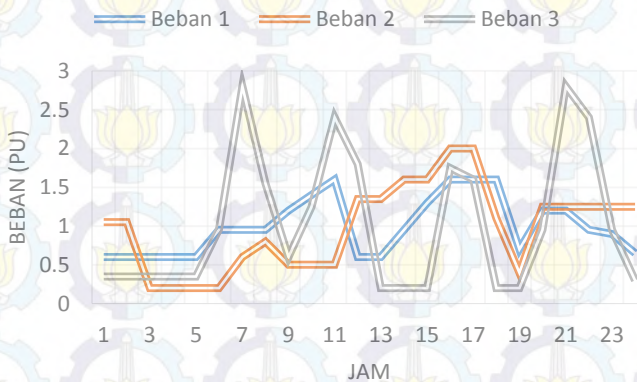
Program simulasi *Optimal Power Flow* dengan pendekatan probabilistik berbasis sebelumnya di simulasikan terlebih dahulu dengan M-file OPF yang telah dibuat. Setelah itu, hasil running M-file dari OPF kemudian diolah lebih lanjut secara statistik. Validasi dimaksudkan untuk membandingkan program POPF FOSMM pada sistem IEEE 5 Bus serta 9 Bus dan juga dengan hasil dari OPF. Hal ini dilakukan untuk mengetahui akurasi dari program POPF terhadap perbedaan jumlah bus dan kasus.

Validasi dilakukan dengan menggunakan dua sistem IEEE dengan tiga profil beban dan tiga generator pada masing masing sistem. Profil beban yang digunakan memiliki tingkat perubahan yang tinggi dan disimulasikan sebagai profil beban selama 24 jam. Data profil beban yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 dengan MVAb sebesar 100 MVA.

Tabel 4.1 Profil Beban

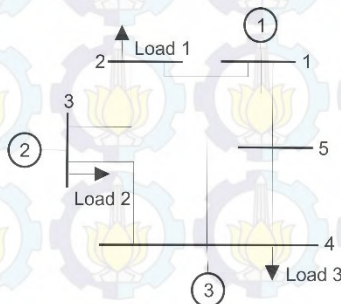
Jam	Beban 1 (pu)	Beban 2 (pu)	Beban 3 (pu)
1	0.6	1.05	0.35
2	0.6	1.05	0.35
3	0.6	0.2	0.35
4	0.6	0.2	0.35
5	0.6	0.2	0.35
6	0.95	0.2	0.96
7	0.95	0.6	2.8
8	0.95	0.8	1.55
9	1.2	0.5	0.6
10	1.4	0.5	1.25
11	1.6	0.5	2.4
12	0.6	1.35	1.8
13	0.6	1.35	0.2
14	0.95	1.6	0.2
15	1.3	1.6	0.2
16	1.6	2	1.75
17	1.6	2	1.6

Jam	Beban 1 (pu)	Beban 2 (pu)	Beban 3 (pu)
18	1.6	1.1	0.2
19	0.7	0.4	0.2
20	1.2	1.25	0.95
21	1.2	1.25	2.8
22	0.95	1.25	2.4
23	0.9	1.25	0.95
24	0.65	1.25	0.3



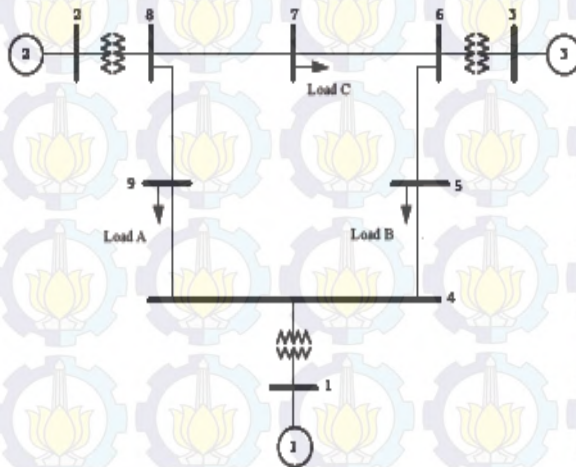
Gambar 4.1 Profil Beban Harian

Single line diagram untuk simulasi adalah IEEE 5 bus dan IEEE 9 bus. *Single line diagram* tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan 4.3 berikut ini.



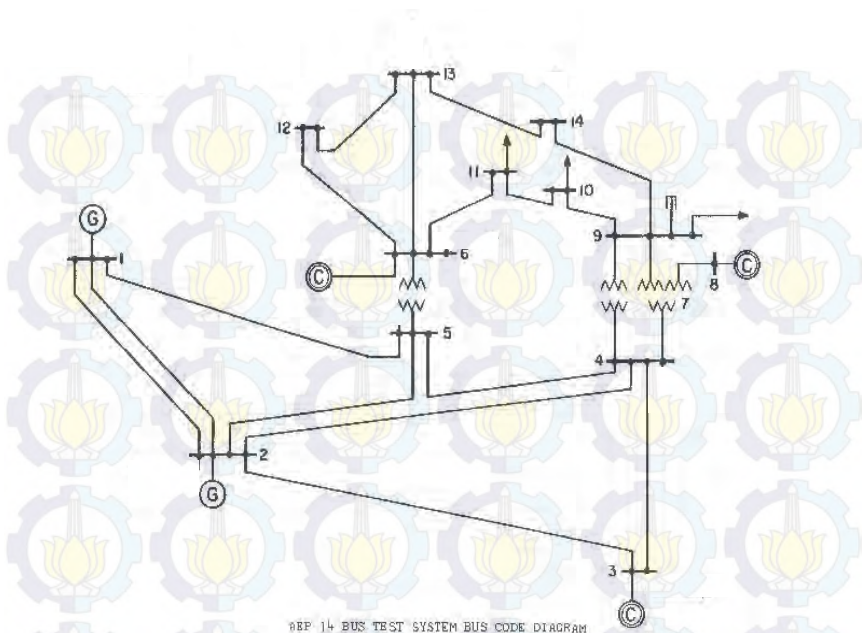
Gambar 4.2 *Single Line Diagram* IEEE 5 Bus

Gambar 4.2 menunjukkan *single line diagram* dari sistem 5 Bus IEEE. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada sistem tersebut memiliki tiga generator yang terletak pada bus 1, bus 3 dan bus 4, dengan generator 4 sebagai *referencenya*. Pada sistem 5 bus ini memiliki tiga beban yaitu pada bus 1, bus 3 dan bus 4. Ketiga beban pada sistem 5 bus ini merupakan beban dinamik 24 jam dengan profil beban seperti pada Gambar 4.1. Untuk keterangan lebih jelas tentang sistem IEEE 5 bus dapat dilihat pada Tabel 4.2.



Gambar 4.3 *Single Line Diagram* IEEE 9 Bus

Sistem IEEE 9 bus memiliki tiga buah pembangkit dengan kapasitas berbeda-beda. Pembangkit-pembangkit tersebut terletak pada bus 1, bus 2 dan bus 3. Pembangkit 1 yang terletak pada bus satu merupakan *reference* dari sistem ini atau *slack bus*. Pada sistem 9 bus ini memiliki tiga beban yang terletak pada bus 5, bus 7 dan bus 9. Seperti halnya dengan sistem 5 bus yang memiliki tiga beban, ketiga beban pada sistem 14 bus ini juga merupakan beban dinamik 24 jam dengan profil beban seperti pada Gambar 4.1. Untuk keterangan lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 4.3.



Gambar 4.4 *Single Line Diagram* IEEE 14 Bus Termodifikasi

Gambar 4.4 adalah *single line diagram* sistem 14 bus IEEE yang telah dimodifikasi. Modifikasi yang dilakukan adalah hanya menggunakan tiga titik beban yaitu pada bus 9, bus 10 dan bus 11. Hal ini dikarenakan menyesuaikan dengan profil beban yang diterapkan pada sistem-sistem sebelumnya. Sistem ini memiliki lima buah generator yang terletak pada bus 1, bus 2, bus 3, bus 6 dan bus 8 dengan bus 1 sebagai *slack* busnya. Generator pada bus 3, bus 6 dan bus 8 juga berfungsi sebagai kapasitor kompensator pada sistem ini. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.2 Data Bus IEEE 5 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	2	0	230
2	1	60	230
3	2	105	230
4	3	35	230
5	1	0	230

Tabel 4.3 Data Bus IEEE 9 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	3	0	345
2	2	0	345
3	2	0	345
4	1	0	345
5	1	60	345
6	1	0	345
7	1	105	345
8	1	0	345
9	1	35	345

Tabel 4.4 Data Bus IEEE 14 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	3	0	300
2	2	0	300
3	2	0	300
4	1	0	300
5	1	0	300
6	2	0	300
7	1	0	300
8	2	0	300
9	1	L1	300
10	1	L2	300
11	1	L3	300
12	1	0	300
13	1	0	300
14	1	0	300

Tabel 4.2, Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 merupakan data bus sistem yang digunakan untuk simulasi. Tipe bus 3 menunjukkan bus tersebut merupakan *slack bus* yang digunakan sebagai referensi. Tipe bus 2 yaitu bus yang terhubung dengan generator. Tipe bus 1 merupakan *load bus*. *Load bus* dengan nilai Pd 0 menunjukkan bahwa bus tersebut tidak terhubung secara langsung dengan beban atau konsumen. Selanjutnya generator akan disebut sebagai unit untuk mempermudah pembacaan, unit dan *load bus* dinamakan berdasarkan nomor pada masing-masing bus. Berikut adalah data pembangkit dan data saluran pada masing-masing bus.

Tabel 4.5 Data pembangkit IEEE 5 bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)	Ramp Rate (MW/Jam)
1	$14P_1$	240	10	40
3	$40P_3$	100	10	40
4	$40P_4$	350	10	40

Tabel 4.6 Data pembangkit IEEE 9 bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)	Ramp Rate (MW/Jam)
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	250	10	40
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	300	10	40
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 335$	270	10	40

Tabel 4.7 Data Pembangkit 14 Bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)
1	$0.043P_1^2 + 20P_1$	332	10
2	$0.025P_2^2 + 20P_2$	140	10
3	$0.01P_3^2 + 40P_3$	100	10
6	$0.01P_4^2 + 40P_4$	100	
8	$0.01P_5^2 + 40P_5$	100	

Tabel 4.8 Data saluran IEEE 5 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	2	0.0281	400
2	1	4	0.0304	400
3	1	5	0.0064	400
4	2	3	0.0108	400
5	3	4	0.0297	400
6	4	5	0.0297	240

Tabel 4.9 Data saluran IEEE 9 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	4	0.0576	250

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
2	4	5	0.092	250
3	5	6	0.17	150
4	3	6	0.0586	300
5	6	7	0.1008	150
6	7	8	0.072	250
7	8	2	0.0625	250
8	8	9	0.161	250
9	9	4	0.085	250

Variabel yang dianalisis yaitu batasan kapasitas saluran, unit pembangkit dan cadangan berputar. Pada Tabel 4.6, 4.7 dan 4.8 dapat dilihat bahwa masing masing bus memiliki kapasitas saluran yang berbeda beda. Hal ini akan mempengaruhi jumlah aliran daya yang akan mengalir dalam saluran tersebut.

Pada profil beban, akan diperlakukan tiga skenario program. Program pertama adalah pada saluran IEEE 5 bus dan program kedua adalah pada saluran IEEE 9 bus dan program terakhir adalah pada saluran IEEE 14 bus. Skenario ini bertujuan untuk menguji akurasi program dalam dua sistem bus yang berbeda. Selain itu, hasil analisisnya juga akan dibandingkan dengan hasil AC OPF.

4.1.1 Profil Sistem 1

4.1.1.1 Hasil Simulasi Sistem 5 Bus dengan AC OPF

Sebelum diolah kedalam bentuk POPF, terlebih dahulu dilakukan running Matlab dengan metode AC OPF. Dari simulasi program akan didapatkan hasil berupa daya terbangkit, daya pada load bus, tegangan bus, sudut tegangan bus dan lambda. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.10 dan 4.11 berikut.

Tabel 4.10 Hasil Daya dan Tegangan Bus Simulasi Program menggunakan AC OPF

Jam	Pg Terbangkit (pu)			Tegangan Bus (pu)				
	1	3	4	1	2	3	4	5
1	0.512	0.8787	0.6194	1.1	1.091	1.097	1.099	1.1
2	0.512	0.8787	0.6194	1.1	1.091	1.097	1.099	1.1
3	0.2478	0.5326	0.3786	1.094	1.086	1.093	1.093	1.094
4	0.2478	0.5326	0.3786	1.094	1.086	1.093	1.093	1.094
5	0.2478	0.5326	0.3786	1.094	1.086	1.093	1.093	1.094
6	0.5677	0.9228	0.6503	1.098	1.089	1.096	1.096	1.098

Jam	Pg Terbangkit (pu)			Tegangan Bus (pu)				
	1	3	4	1	2	3	4	5
7	1.2867	1.8972	1.3223	1.1	1.09	1.097	1.098	1.1
8	0.9525	1.4088	0.9874	1.1	1.09	1.097	1.098	1.1
9	0.6239	0.9996	0.7054	1.099	1.089	1.096	1.097	1.099
10	0.9125	1.3476	0.948	1.1	1.09	1.097	1.099	1.1
11	1.3294	1.9622	1.3771	1.1	1.09	1.097	1.099	1.1
12	1.0839	1.5989	1.1167	1.1	1.09	1.096	1.098	1.099
13	0.5562	0.9421	0.6637	1.1	1.09	1.097	1.099	1.1
14	0.7474	1.1876	0.8363	1.1	1.089	1.096	1.099	1.1
15	0.8626	1.3307	0.9382	1.1	1.089	1.096	1.099	1.1
16	1.4756	2.3458	1.6491	1.1	1.089	1.096	1.1	1.1
17	1.4613	2.258	1.5876	1.1	1.089	1.096	1.1	1.1
18	0.8104	1.2476	0.8815	1.1	1.089	1.096	1.099	1.1
19	0.294	0.5935	0.4214	1.1	1.091	1.098	1.099	1.1
20	0.9704	1.4489	1.0183	1.1	1.089	1.096	1.099	1.1
21	1.3048	2.3038	1.8339	1.1	1.09	1.097	1.099	1.1
22	1.3418	1.9844	1.3847	1.1	1.09	1.097	1.099	1.1
23	0.8703	1.326	0.9309	1.1	1.09	1.096	1.098	1.099
24	0.5739	0.9612	0.677	1.1	1.09	1.097	1.099	1.1

Tabel 4.11 Hasil Daya Reaktif dan Sudut Tegangan Simulasi
Program menggunakan AC OPF

Jam	Qg Terbangkit (MW)			Sudut Tegangan Bus				
	1	3	4	1	2	3	4	5
1	0.2334	1.7112	1.3235	0.756	-0.603	-0.867	0	0.622
2	0.2334	1.7112	1.3235	0.756	-0.603	-0.867	0	0.622
3	0.2572	1.6878	1.2887	0.453	-0.294	-0.319	0	0.372
4	0.2572	1.6878	1.2887	0.453	-0.294	-0.319	0	0.372
5	0.2572	1.6878	1.2887	0.453	-0.294	-0.319	0	0.372
6	0.2719	1.6943	1.2949	0.928	-0.288	-0.315	0	0.764
7	0.2363	1.7071	1.3275	0.997	-0.477	-0.604	0	0.821
8	0.2431	1.713	1.3259	0.943	-0.626	-0.789	0	0.776
9	0.2887	1.7088	1.2792	0.871	-0.694	-0.726	0	0.717
10	0.2461	1.7182	1.3238	0.857	-0.86	-0.847	0	0.705
11	0.2462	1.7265	1.3244	0.782	-1.063	-0.996	0	0.644
12	0.2564	1.7236	1.3208	0.923	-0.681	-1.038	0	0.76
13	0.2286	1.7241	1.3297	0.77	-0.77	-1.103	0	0.633
14	0.2563	1.7494	1.3266	0.724	-1.222	-1.53	0	0.596
15	0.2576	1.7667	1.3306	0.593	-1.578	-1.791	0	0.489
16	0.261	1.8147	1.3402	0.372	-2.181	-2.386	0	0.307

Jam	Qg Terbangkit (MW)			Sudut Tegangan Bus				
	1	3	4	1	2	3	4	5
17	0.261	1.8147	1.3402	0.372	-2.181	-2.386	0	0.307
18	0.2641	1.7531	1.3231	0.618	-1.51	-1.551	0	0.509
19	0.2408	1.6931	1.3099	0.452	-0.483	-0.532	0	0.372
20	0.2614	1.7409	1.3228	0.726	-1.215	-1.392	0	0.598
21	0.2382	1.7421	1.334	0.727	-1.214	-1.391	0	0.598
22	0.2385	1.7317	1.3314	0.82	-0.961	-1.205	0	0.675
23	0.2594	1.7287	1.3206	0.838	-0.911	-1.169	0	0.69
24	0.23	1.7213	1.3292	0.81	-0.728	-1.034	0	0.666

4.1.1.2 Hasil Simulasi Sistem 5 Bus dengan FOSMM

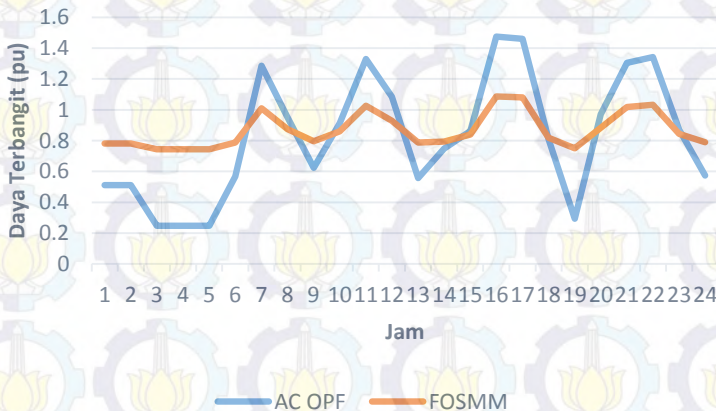
Berdasarkan hasil simulasi di atas dapat dilihat daya terbangkit, daya reaktif terbangkit, tegangan bus dan sudut tegangan bus mempunyai nilai yang berbeda-beda setiap jamnya. Hal ini disebabkan karena adanya perubahan profil beban setiap jamnya. Dari hasil simulasi AC OPF ini juga didapatkan matriks Jacobian yang dapat dilihat pada lampiran. Matriks ini digunakan untuk perhitungan statistik dengan metode FOSMM. Hasil simulasi dengan metode POPF FOSMM dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut ini.

Tabel 4.12 Hasil Daya dan Tegangan Bus Simulasi FOSMM

Jam	Pg Terbangkit (pu)			Tegangan Bus (pu)				
	1	3	4	1	2	3	4	5
1	0.7807	1.2486	0.8858	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
2	0.7807	1.2486	0.8858	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
3	0.7437	1.2002	0.8521	1.098	1.089	1.095	1.097	1.098
4	0.7437	1.200	0.8521	1.098	1.089	1.095	1.097	1.098
5	0.7437	1.200	0.8521	1.098	1.089	1.095	1.097	1.098
6	0.7885	1.2549	0.8901	1.099	1.089	1.096	1.097	1.098
7	1.0098	1.5449	1.086	1.099	1.089	1.096	1.097	1.099
8	0.8759	1.3491	0.952	1.099	1.089	1.096	1.097	1.099
9	0.7964	1.2656	0.8978	1.099	1.089	1.096	1.097	1.099
10	0.8599	1.3246	0.9368	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
11	1.0273	1.5713	1.108	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
12	0.9286	1.4255	1.004	1.099	1.089	1.096	1.097	1.099
13	0.7868	1.2575	0.8920	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
14	0.7936	1.2603	0.8921	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
15	0.8399	1.3178	0.9328	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
16	1.0870	1.7273	1.2172	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
17	1.0813	1.6919	1.1926	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
18	0.8189	1.2844	0.9102	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099

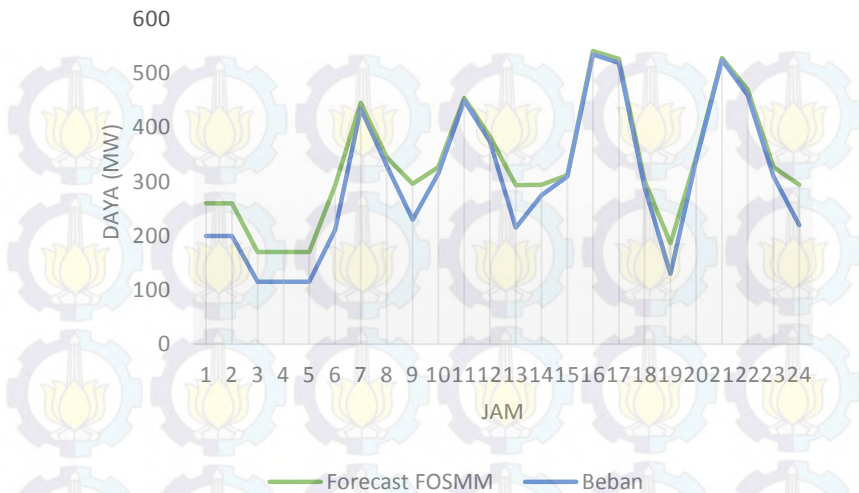
Jam	Pg Terbangkit (pu)			Tegangan Bus (pu)				
	1	3	4	1	2	3	4	5
19	0.7501	1.2086	0.8581	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
20	0.8832	1.3653	0.9649	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
21	1.0175	1.7090	1.2911	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
22	1.0322	1.5804	1.1114	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099
23	0.8429	1.3159	0.9299	1.099	1.089	1.096	1.097	1.099
24	0.7893	1.2602	0.8939	1.099	1.089	1.096	1.098	1.099

Untuk data yang lebih lengkap tentang perbedaan Qg, sudut tegangan bus dan varians, dapat dilihat pada lampiran. Dari Tabel 4.10 dan 4.12 dapat dilihat bahwa simulasi menggunakan *FOSMM* memiliki sebaran data yang lebih sempit daripada AC OPF. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.4 dibawah ini.



Gambar 4.5 Grafik Daya Terbangkit Sistem IEEE 5 Bus

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa hasil simulasi menggunakan AC OPF memiliki rata-rata perubahan daya terbangkit yang cukup signifikan. Berbeda dengan hasil dari simulasi menggunakan metode *FOSMM* yang cenderung memiliki grafik linier. Hal ini dikarenakan metode *FOSMM* membuat pendekatan sistem yang tidak linier menjadi linier dengan mempertimbangkan kapasitas saluran dan daya masing masing pembangkit.



Gambar 4.6 Perbedaan *Forecast* Daya Terbangkit dengan Profil Beban

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa prediksi daya yang akan dibangkitkan atau *forecast* dari pembangkit disistem 5 bus mendekati profil beban yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa *forecasting* pada sistem 5 bus dengan metode FOSMM berjalan dengan baik dan sesuai. Perbedaan daya terbangkit total dengan beban hanya mencapai 10% atau sekitar 700 MW.

4.1.2 Profil Sistem 2

4.1.2.1 Hasil Simulasi Sistem 9 Bus dengan AC OPF

Seperti halnya pada sistem IEEE 5 bus, pada sistem 9 bus ini juga terlebih dahulu dilakukan simulasi menggunakan AC OPF. Simulasi tersebut akan menghasilkan data daya terbangkit, tegangan, sudut tegangan serta matriks Jacobian. Matriks Jacobian kemudian akan diolah kembali menggunakan FOSMM untuk memperoleh hasil yang sama dengan hasil AC OPF. Hasil simulasi tegangan dan sudut tegangan dapat dilihat pada lampiran. Sedangkan hasil daya terbangkit dari AC OPF dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil Daya Terbangkit 9 Bus menggunakan Simulasi AC OPF

Jam	Pg Terbangkit (pu)		
	1	3	4
1	0.512	0.8787	0.6194
2	0.512	0.8787	0.6194
3	0.2478	0.5326	0.3786
4	0.2478	0.5326	0.3786
5	0.2478	0.5326	0.3786
6	0.5677	0.9228	0.6503
7	1.2867	1.8972	1.3223
8	0.9525	1.4088	0.9874
9	0.6239	0.9996	0.7054
10	0.9125	1.3476	0.948
11	1.3294	1.9622	1.3771
12	1.0839	1.5989	1.1167
13	0.5562	0.9421	0.6637
14	0.7474	1.1876	0.8363
15	0.8626	1.3307	0.9382
16	1.4756	2.3458	1.6491
17	1.4613	2.258	1.5876
18	0.8104	1.2476	0.8815
19	0.294	0.5935	0.4214
20	0.9704	1.4489	1.0183
21	1.3048	2.3038	1.8339
22	1.3418	1.9844	1.3847
23	0.8703	1.326	0.9309
24	0.5739	0.9612	0.677

Hasil running menggunakan AC OPF memiliki pendekatan yang hampir mirip dari profil beban. Namun, pada beberapa waktu tertentu hasil dari AC OPF tidak sesuai dengan beban yang diinginkan. Selain itu, AC OPF tidak bisa memprediksi berapa daya yang dibutuhkan oleh beban pada jam berikutnya, sehingga metode ini tidak bisa digunakan untuk sistem *forecasting*.

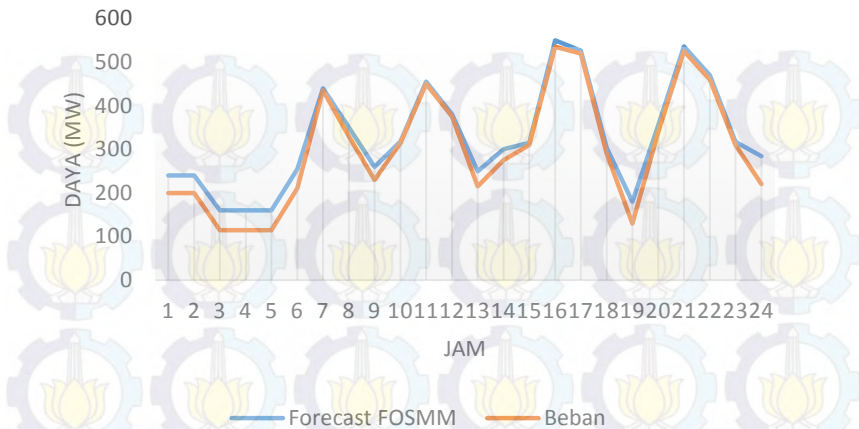
4.1.2.2 Hasil Simulasi Sistem 9 Bus dengan FOSMM

Setelah diperoleh matriks Jacobian dari hasil simulasi AC OPF, maka didapatkan hasil menggunakan FOSMM seperti pada Tabel 4.14 dibawah ini.

Tabel 4.14 Hasil Daya Terbangkit 9 Bus menggunakan *FOSMM*

Jam	Pg Terbangkit (pu)		
	1	3	4
1	0.773295	1.23908	0.878785
2	0.773295	1.23908	0.878785
3	0.763989	1.229407	0.871791
4	0.763989	1.229407	0.871791
5	0.763989	1.229407	0.871791
6	0.779244	1.243801	0.880251
7	0.994127	1.507328	1.081374
8	0.85848	1.334476	0.944774
9	0.786352	1.252562	0.887299
10	0.84733	1.318552	0.934104
11	1.022878	1.536983	1.107863
12	0.900894	1.392429	0.985469
13	0.777816	1.245245	0.883432
14	0.807749	1.282817	0.909316
15	0.834079	1.314442	0.931483
16	1.119907	1.746122	1.252993
17	1.10032	1.694155	1.210627
18	0.821312	1.295253	0.918402
19	0.763209	1.228066	0.871164
20	0.864155	1.345781	0.953149
21	1.097304	1.784732	1.511735
22	1.018501	1.54821	1.10573
23	0.835909	1.313271	0.929729
24	0.779914	1.247485	0.884719

Hasil simulasi *FOSMM* pada sistem 9 bus memiliki karakteristik yang hampir sama dengan hasil simulasi *FOSMM* pada sistem 5 bus. Daya yang terbangkit dari masing masing generator memiliki deviasi yang tidak terlalu besar pada setiap jam nya. Berbeda dengan sistem 5 bus, pada sistem 9 bus perbedaan hasil antara simulasi menggunakan AC OPF dan *FOSMM* tidak terlalu besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Perbandingan *Forecast* FOSMM Sistem 9 Bus

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa prediksi daya yang akan dibangkitkan atau *forecast* dari pembangkit disistem 9 bus juga mendekati profil beban yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa *forecasting* pada sistem 9 bus dengan metode FOSMM berjalan dengan baik dan sesuai. Perbedaan daya terbangkit total dengan beban hanya mencapai 8% atau sekitar 570 MW, lebih kecil daripada hasil FOSMM pada sistem 5 bus IEEE.

4.1.3 Profil Sistem 3

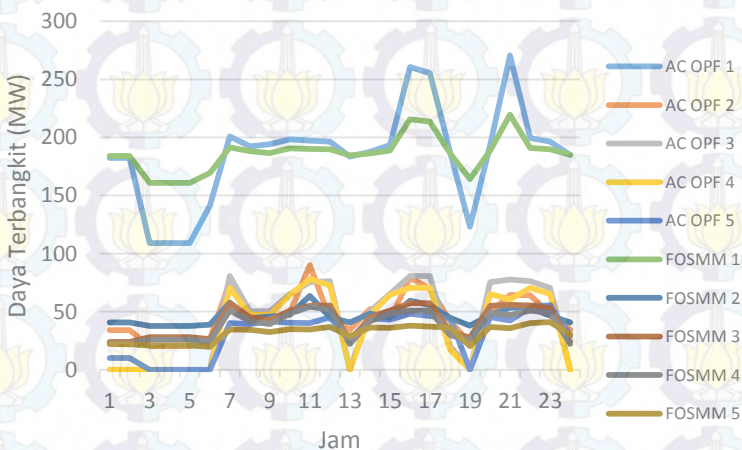
4.1.3.1 Hasil Simulasi Sistem 14 Bus dengan AC OPF

Hasil simulasi program AC OPF pada sistem IEEE 9 bus dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Hasil Daya Terbangkit 14 Bus dengan AC OPF

Jam	Pg Terbangkit (pu)				
	1	2	3	6	8
1	182.37	33.94	0	0	10.06
2	182.37	33.94	0	0	10.06
3	109.08	20.26	0	0	0
4	109.08	20.26	0	0	0
5	109.08	20.26	0	0	0
6	141.36	26.38	0	0	0
7	200.86	75.6	80.56	70.34	40.23

Jam	Pg Terbangkit (pu)				
	1	2	3	6	8
8	192.3	42.1	50.32	47.35	39.41
9	194.2	43.1	50.32	47.35	41.5
10	198.3	49.24	65.235	64.25	40.52
11	197.3	89.89	75.3	78.24	40.21
12	196.36	44.12	76.3	72.31	45.2
13	183.57	34.21	0	0	25.89
14	187.52	52.31	50.32	47.35	44.21
15	193.42	43.24	65.235	64.25	43.124
16	260.55	79.34	80.56	70.34	48.24
17	255.5	69.52	80.56	70.34	46.21
18	187.42	42.123	20.32	17.35	44.3
19	122.98	22.9	0	0	0
20	193.4	49.23	75.42	65.325	45.35
21	270.56	64.34	77.53	60.56	42.4
22	199.5	64.2	76.32	70.4	53.5
23	196.5	47.47	70.34	65.23	55.43
24	184.87	34.45	0	0	29.03



Gambar 4.8 Daya Terbangkit AC OPF dengan FOSMM

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa pembagian pembebanan pada generator dengan FOSMM lebih linier dan merata daripada pada AC

OPF. Hal ini membuat kinerja generator menjadi lebih optimal dan pada sistem FOSMM pembebanan ini dapat digunakan sebagai bentuk *forecasting* penjadwalan generator dengan beban dinamik.

4.1.3.2 Hasil Simulasi Sistem 14 Bus dengan FOSMM

Setelah didapatkan variabel matriks Jacobian melalui simulasi AC OPF, kemudian dilakukan pengolahan data menggunakan pendekatan linierisasi FOSMM. Sehingga didapatkan hasil daya yang terbangkit seperti pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Daya Terbangkit 14 Bus dengan FOSMM

Jam	Pg Terbangkit (pu)				
	1	2	3	6	8
1	1.841378	0.407242	0.240027	0.225013	0.219247
2	1.841378	0.407242	0.240027	0.225013	0.219247
3	1.609915	0.375927	0.278827	0.258344	0.209527
4	1.609915	0.375927	0.278827	0.258344	0.209527
5	1.609915	0.375927	0.278827	0.258344	0.209527
6	1.695409	0.38806	0.263559	0.243153	0.197224
7	1.915666	0.578258	0.5709	0.509343	0.347217
8	1.881377	0.443963	0.44994	0.417234	0.343951
9	1.865979	0.455353	0.4269	0.392801	0.325096
10	1.905476	0.472605	0.5096	0.485078	0.348411
11	1.901498	0.635781	0.54986	0.541331	0.347187
12	1.897664	0.452059	0.55386	0.517333	0.367225
13	1.846149	0.406676	0.239373	0.222565	0.287246
14	1.862231	0.484983	0.44994	0.417312	0.363342
15	1.885976	0.448498	0.5096	0.485343	0.359019
16	2.156666	0.594088	0.5709	0.51012	0.379757
17	2.136308	0.554478	0.5709	0.51012	0.371568
18	1.861838	0.444015	0.32994	0.296697	0.363708
19	1.642953	0.379815	0.273762	0.251432	0.203208
20	1.885854	0.47259	0.55034	0.489528	0.367899
21	2.195852	0.533327	0.55878	0.470384	0.356041
22	1.910311	0.532714	0.55394	0.5098	0.400598
23	1.898261	0.465511	0.53002	0.489029	0.408339
24	1.851525	0.407893	0.237425	0.222406	0.301375

Dari Tabel 4.15 dan 4.16 dapat dilihat bahwa hasil simulasi sistem dengan menggunakan FOSMM cenderung membagi beban ke semua generator. Sedangkan pada simulasi AC OPF pada unit 3 dan 6 terkadang tidak membangkitkan daya sama sekali.

4.2 Analisis Hasil Simulasi

4.2.1 Nilai Rata-Rata dan Penyimpangan Baku

Hasil simulasi *FOSMM* berisi tegangan dan sudut tegangan bus, serta daya yang dibangkitkan kemudian dianalisis secara statistik untuk menemukan nilai rata-rata dan simpangan baku. Melalui persamaan (3.1) dan (3.2), didapatkan variabel statistik seperti pada Tabel 4.17, 4.18 dan 4.19.

Tabel 4.17 Variabel Statistik pada Sistem 5 Bus

i	μV_{mi}	σV_{mi}	μV_{ai}	σV_{ai}
1	1.099122	0.037898	0.7081	0.003724
2	1.089286	0.077642	-0.9055	0.006599
3	1.096123	0.078214	-1.0615	0.006690
4	1.097950	0.093165	0.0000	0.000000
5	1.099039	0.048399	0.5828	0.004404
i	μP_{gi}	σP_{gi}	μQ_{gi}	σQ_{gi}
1	0.866778	0.404277	0.253483	0.043102
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	1.367219	0.404392	1.727408	0.000000
4	0.970481	0.403236	1.318733	0.000204
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Dari Tabel 4.17 dapat dilihat bahwa hasil simulasi *FOSMM* pada sistem 5 bus IEEE telah memenuhi standar. Tegangan pada bus berada diantara 1.08 pu dengan simpangan sebesar 0.03 – 0.07, sehingga tidak melebihi toleransi tegangan yaitu 0.9 - 1.1 pu. Sedangkan pada bus yang tidak memiliki generator, simpangan baku dari P_g dan Q_g adalah nol karena tidak menghasilkan daya untuk sistem.

Tabel 4.18 Variabel Statistik pada Sistem 9 Bus

i	μV_{mi}	σV_{mi}	μV_{ai}	σV_{ai}
1	1.099847	0.008288	0.0000	0.000000
2	1.099127	0.012953	-23.4580	0.133064
3	1.095492	0.009253	-25.8591	0.049061
4	1.057404	0.033954	-31.4860	0.039472
5	1.068738	0.024471	-34.1328	0.056877
6	1.094036	0.026654	-29.0148	0.026476
7	1.085191	0.021451	-31.0676	0.036359
8	1.089947	0.030553	-28.2341	0.023812
9	1.098980	0.019620	-33.6964	0.053544

i	μ Pgi	σ Pgi	μ Qgi	σ Qgi
1	0.868668	0.525532	1.073455	0.442663
2	1.366587	0.500565	0.478701	0.361568
3	0.981523	0.440442	0.958784	0.419904
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

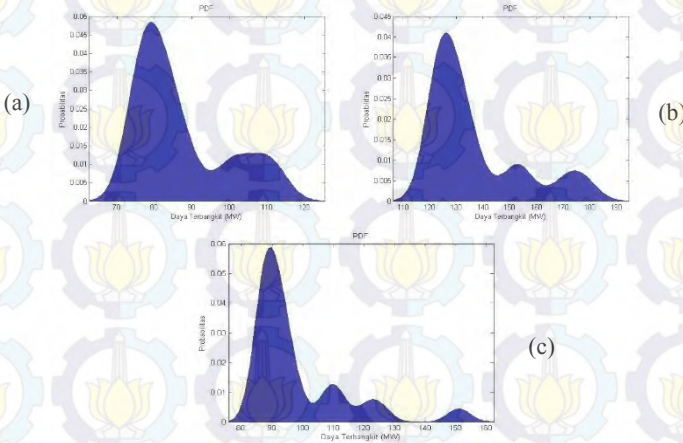
Untuk sistem 9 bus, tegangan pada masing masing bus sudah memenuhi batas toleransi tegangan. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa tegangan di masing-masing bus berkisar antara 1.02 – 1.1 pu. Sama seperti pada sistem 5 bus, bus yang tidak memiliki generator memiliki simpangan baku nol pada Pg dan Qg nya. Sedangkan untuk bus dengan tipe 3 atau *slack bus* memiliki simpangan baku nol karena merupakan referensi dari semua bus.

Tabel 4.19 Variabel Statistik pada Sistem 14 Bus

i	μ Vmi	σ Vmi	μ Vai	σ Vai
1	1.013703	0.049749	0.0000	0.129719
2	1.000392	0.063355	-2.8484	0.196366
3	0.996324	0.020093	-5.5709	0.062725
4	0.969837	0.065849	-7.6476	0.235357
5	0.973437	0.060154	-6.8689	0.218017
6	1.039712	0.044165	-15.2314	0.120283
7	1.000900	0.000000	-15.0929	0.126507
8	1.033006	0.001031	-14.0660	0.038195
9	0.988802	0.029394	-19.7029	0.038195
10	0.966709	0.031967	-22.1014	0.153235
11	0.981101	0.022071	-20.4688	0.089501
12	1.036707	0.026871	-15.5614	0.052936
13	1.031279	0.048079	-15.8272	0.073331
14	1.006544	0.027390	-17.9604	0.034968
i	μ Pgi	σ Pgi	μ Qgi	σ Qgi
1	1.862895	0.384025	0.000154	0.007678
2	0.462206	0.390874	0.034560	0.008334
3	0.417336	0.386249	0.084242	0.006685

i	μ Pgi	σ Pgi	μ Qgi	σ Qgi
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.383586	0.387356	0.129017	0.007730
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.312729	0.385115	0.239946	0.006900
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Hasil simulasi *FOSMM* dari masing-masing sistem telah memenuhi kriteria saluran. Seperti pada tegangan dimana V_{max} pada Bus 1 sistem 5 Bus adalah 1.1 pu dan V_{min} sebesar 0.9 pu, sedangkan hasil simulasi adalah 1.1 pu maksimal dan 1.05 pu minimal. Mean menunjukkan nilai rata-rata dari sistem tersebut selama 24 jam, sementara penyimpangan baku adalah sebaran data dari nilai rata-rata ketika sistem tersebut berjalan. Pada *slack bus* di ketiga sistem tidak memiliki rata-rata dan variasi pada sudut tegangan, hal ini dikarenakan *slack bus* merupakan referensi tegangan pada setiap bus saluran.



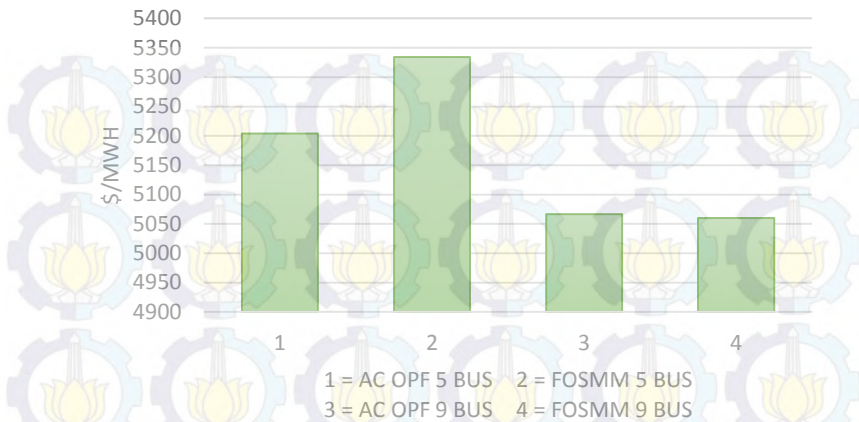
Gambar 4.9 Persebaran Data Daya Terbangkit Masing Masing Bus pada Sistem IEEE 9 Bus, (a) Pg1, (b) Pg2 dan (c) Pg3

4.2.2 Perbandingan Biaya dengan AC OPF

Biaya pembangkitan dari simulasi AC OPF dapat diketahui melalui running program matpower dengan mempertimbangkan *cost function* nya. Sedangkan untuk biaya pembangkitan dari *FOSMM* di dekati dengan turunan pertamanya. Hasil dari kedua metode ini dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Perbandingan Biaya Pembangkitan

Jam	IEEE 5 Bus		IEEE 9 Bus	
	AC OPF	FOSMM	AC OPF	FOSMM
1	2807.75	2171.635283	2923.06	2542.325235
2	2807.75	2171.635283	2923.04	2542.325235
3	1612.8	388.6086675	1794.89	502.5031354
4	1612.8	388.6086675	1794.89	502.5031354
5	1612.8	388.6086675	1794.89	502.5031354
6	2960.6	2499.202523	3140.98	2856.020255
7	11185.17	9223.916933	9110.82	8524.581595
8	6987.13	6075.416933	5708.3	5751.248645
9	3228.85	3073.945043	3474.49	3306.806785
10	6388.63	5626.616933	5358.16	5414.444945
11	11791.44	9678.716933	9662.73	8914.009185
12	8790.81	7428.116933	6923.48	6831.366275
13	3019.77	2626.089833	3176.92	2906.299565
14	4800.18	4435.016933	4355.07	4366.698665
15	6207.25	5490.416933	5171.61	5230.132335
16	15227.09	12255.41693	12672.99	10832.76733
17	14627.09	11805.41693	12015.66	10441.73003
18	5402.19	4886.516933	4725.26	4770.207405
19	1823.72	863.4461225	1957.34	861.7657154
20	7397.41	6383.216933	5936.4	5964.090445
21	14797.39	11932.91693	12701.28	10765.21257
22	12193.44	9980.216933	9809.19	9014.971185
23	6192.77	5479.616933	5161.58	5220.010335
24	3089.63	2775.774863	3264.18	3026.436865
μ	5204.06	5334.54	5066.29	5060.13



Gambar 4.10 Perbandingan Biaya Pembangkitan

Dari data di atas dapat dilihat bahwa pada sistem 5 bus, biaya pembangkitan *FOSMM* lebih mahal 2% daripada AC OPF. Namun, pada sistem 9 Bus justru *FOSMM* memiliki biaya pembangkitan yang lebih murah 0.5% daripada AC OPF. Hal ini disebabkan karena pada perbedaan Jacobian matriks yang sangat besar setiap jamnya pada sistem 5 bus. Selain itu, sistem *FOSMM* yang bisa digunakan untuk memprediksi beban pada jam selanjutnya, hal ini lah yang mengakibatkan terjadi kesalahan penghitungan pada biaya masing masing sistem.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisi, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. *First Order Second Moment Method* (FOSMM) dapat digunakan sebagai *forecasting* pembagian pembebanan pembangkit dengan mempertimbangkan kapasitas saluran. Hasil *forecast* dari FOSMM memiliki deviasi sebesar 10% pada sistem IEEE 5 bus, 8% pada sistem IEEE 9 bus dan 5% pada sistem modifikasi IEEE 14 bus.
2. Output dari POPF adalah nilai rata-rata dan penyimpangan baku masing-masing variabel, dimana rata-rata merupakan nilai rata-rata keseluruhan sistem dan penyimpangan baku merupakan besarnya sebaran data. Dimana pada sistem 5 bus, tegangan pada masing masing bus memiliki nilai antara 1.7 - 1.1 pu, sedangkan pada sistem 9 bus dan 14 bus memiliki tegangan antara 1.02 - 1.1 pu yang memenuhi batas toleransi tegangan pada bus yaitu 0.9 – 1.1 pu.
3. Hasil perhitungan FOSMM memiliki persebaran data yang kecil dengan deviasi sebesar 5% namun memiliki rata-rata yang serupa dengan model AC OPF.
4. Pada sistem 9 dan 14 bus, hasil FOSMM memiliki biaya pembangkitan yang lebih murah 0.5% atau 50 USD, sedangkan sistem 5 bus lebih mahal 2% atau 200 USD daripada menggunakan AC OPF. Namun, metode AC OPF tidak bisa digunakan sebagai *forecasting* pembangkit.

5.2 Saran

Adapun saran sebagai pertimbangan penelitian selanjutnya pada bidang operasi sistem tenaga berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membandingkan dengan metode POPF yang sudah ada seperti MCS atau metode estimasi titik.
2. Mempertimbangkan *ramp rate* generator.
3. Mengembangkan POPF menjadi *unit commitment* sehingga semakin mendekati keadaan *real* sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. G. Muljo Adji, "Gambaran Umum Pengelolaan Sistem Jawa Bali", Ekspose Sekuriti Sistem Jawa Bali, Jakarta, 2005.
- [2] Li, Xue, Yuzeng Li, dan Shaohua Zhang. 2008. "Analysis of Probabilistic Optimal Power Flow Taking Account of the Variation of Load Power". IEEE Trans. Power Syst., Vol 21, No. 3 992-999.
- [3] Zou, Bin and Qing Xiao. 2013. "Solving Probabilistic Optimal Power Flow Problem Using Quasi Monte Carlo Method and Ninth-Order Polynomial Normal Transformation". IEEE Trans. Power Syst.
- [4] M. E. El-Hawary dan G. A. N. Mbamalu. 1991. "A Comparison of Probabilistic Perturbation and Deterministic Based Optimal Power Flow Solutions". IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 3, pp. 1099–1105,
- [5] M. Madrigal, K. Ponnambalam, dan V. H. Quintana. 1998. "Probabilistic Optimal Power Flow". Proc. IEEE Can. Conf. Electrical and Computer Engineering, Waterloo, ON, Canada, pp. 385–388.
- [6] A. Schellenberg, W. Rosehart, dan J. Aguado. 2004. "Cumulant Based Probabilistic Optimal Power Flow (P-OPF)". Proc. Int. Conf. Probabilistic Methods Applied Power Systems, pp. 506–511.
- [7] A. Schellenberg, W. Rosehart, dan J. Aguado. 2005. "Cumulant-Based Probabilistic Optimal Power Flow (P-OPF) With Gaussian And Gamma Distributions". IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 2, pp. 773–781, May 2005.
- [8] Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [9] Ameli, Mohammad Taghi, Moslehpour, Saeid, Golnadsadat, Mahdaviikhah, "Determining the Spinning Reserve In Power Systems By Corrected Recursove PJM Method", Proc. of the 2008 IAJC-IJME International Conference, 2008.
- [10] Billinton, R., Allan, R.N, "Reliability Evaluation of Power Systems", Pitman Publisher, Boston, 1984.
- [11] Gooi, B., Mendes, D.P, Bell, K.R.W, dkk, "Optimal Scheduling of Spinning Reserve", IEEE Trans. Power Systems, vol.14 no.4, November 1999.
- [12] Su, Ching-Tzong, Lin, Chi-Min, Wang, Yung-Fu, "Economic Dispatch and Spinning Reserve Scheduling for Generation

Transmission Systems”, IEEE MELECON 2004, Dubrovnik, Kroasia, Mei 2004. [13] Chapman, Stephen J., “Electric Machinery Fundamentals”, McGraw-Hill, 2005.

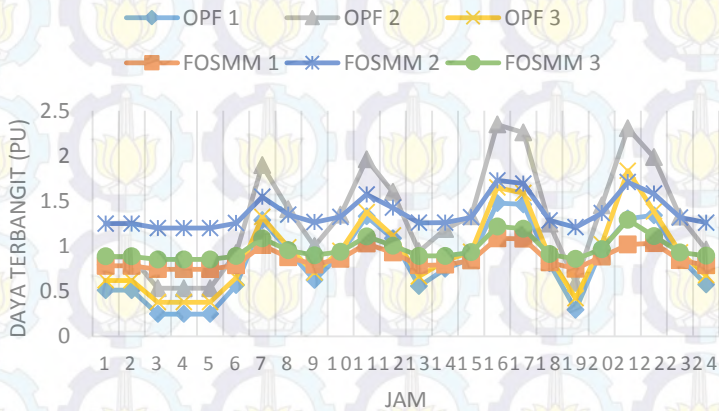
[15] Marsudi, Djiteng, “Operasi Sistem Tenaga Listrik”, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006.

[16] Marsudi, Djiteng, “Pembangkitan Energi Listrik”, Erlangga, Jakarta, 2006.

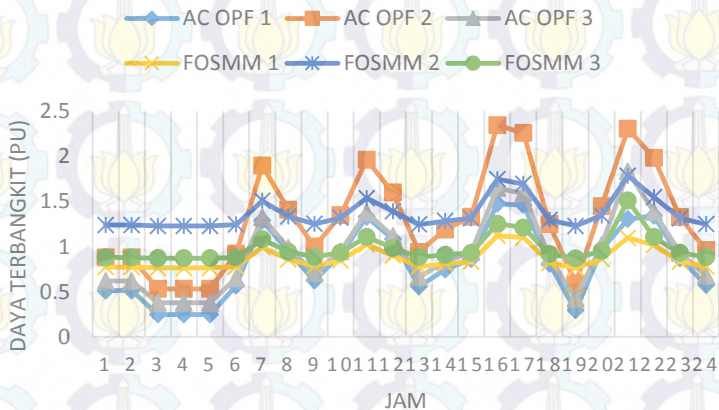
[17] Xiao, Qing. 2015. “Comparing Three Methods for Solving Probabilistic Optimal Power Flow”. Electric Power System Research 124 (2015) 92-99.

LAMPIRAN

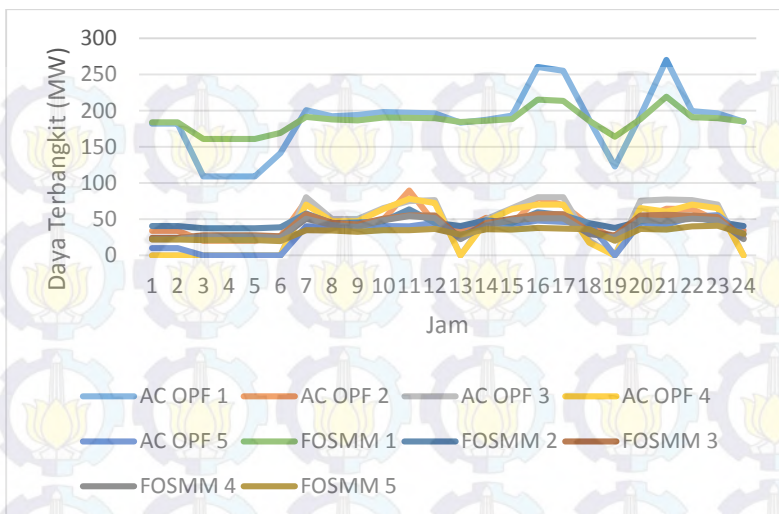
A. Perbandingan Hasil AC OPF dan FOSMM



Gambar A.1 Perbandingan Hasil pada Sistem 5 Bus IEEE



Gambar A.2 Perbandingan Hasil pada Sistem 9 Bus IEEE



Gambar A.3 Perbandingan Hasil pada Sistem 14 Bus IEEE

RIWAYAT PENULIS



MOH MALIK AFANDI, lahir di Tuban. Penulis tamat dari bangku sekolah dasar di SDN Minohorejo I pada tahun 2005 dan melanjutkan di sekolah menengah pertama di SMPN 6 Tuban, lulus tahun 2008. Setelah lulus SMP, penulis melanjutkan sekolah ke SMAN 2 Tuban. Pada tahun 2012, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik elektro dan mengambil konsentrasi dalam Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis turut aktif dalam berbagai organisasi diantaranya UKM Robotika ITS, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS dan Organisasi Djarum Beasiswa Plus. Selain itu beberapa prestasi yang pernah diperoleh penulis antara lain Juara 1 Writing Competition Beswan Djarum dan Young Reseach Award pada konferensi internasional di Nanyang Technological University. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email : afandi.malik1206@gmail.com